

Aus der Orthopädischen Klinik der
Universität Düsseldorf

Direktor: Professor Dr. K.-P. Schulitz

Das hintere Kreuzband als Stabilisator des Kniegelenks.

Eine experimentelle Studie zur Ermittlung der Bandspannung
in den verschiedenen Anteilen des hinteren Kreuzbandes
mit Hilfe eines Dehnungsmeßstreifens.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Rainer Drews / Uwe Heyll

1983



Aus der Orthopädischen Klinik der
Universität Düsseldorf

Direktor : Professor Dr. K.-P. Schulitz

Das hintere Kreuzband als Stabilisator des Kniegelenks.
Eine experimentelle Studie zur Ermittlung der Bandspannung
in den verschiedenen Anteilen des hinteren Kreuzbandes
mit Hilfe eines Dehnungsmeßstreifens.

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Rainer Drews
Uwe Heyll

1983



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548402_0003

Lebenslauf

Am 29. Juli 1956 wurde ich, Rainer Drews, in Hückeswagen geboren. 1963 wurde ich in die evangelische Grundschule in Hückeswagen eingeschult. Nach vier Schuljahren wechselte ich zum Röntgen-Gymnasium in Remscheid-Lennep und bestand dort 1975 das Abitur. Nach Ableistung meines Wehrdienstes begann ich 1980 an der Universität Düsseldorf Medizin zu studieren. Im Frühjahr 1982 bestand ich die ärztliche Vorprüfung.

Lebenslauf

Ich, Uwe Heyll, wurde am 24. Juni 1959 in Düsseldorf geboren. Im Juli 1977 bestand ich das Abitur am Albert Einstein Gymnasium in Kaarst und begann im Wintersemester 1977/78 mein Medizinstudium an der Universität Düsseldorf. Dort bestand ich im August 1979 die ärztliche Vorprüfung. Zur Zeit befinde ich mich im praktischen Jahr an der Universitätsklinik Düsseldorf und werde voraussichtlich Ende 1983 mein Studium mit dem dritten Teil der ärztlichen Prüfung beenden

An dieser Stelle möchten wir uns bei Herrn Professor Dr. K.-P. Schulitz, Direktor der Orthopädischen Klinik der Universität Düsseldorf, für die Überlassung des Themas bedanken.

Herrn Oberarzt Dr. med. Hille danken wir für seine Hilfe und seine Geduld bei der Betreuung der Arbeit.

Den Kommilitonen Gerd und Kurt Schöppe danken wir für ihre Anleitung bei der praktischen Durchführung der Versuche.

Herrn Dipl-Ing. Rudolf Zimmerer danken wir für seine Erläuterungen der elektronischen Meßvorrichtung.

Herrn Dr. Teschner danken wir dafür, daß er uns das Versuchslabor und verschiedene Instrumente zur Verfügung stellte.

Herrn Schmidt, Angestellter des Instituts für Rechtsmedizin, danken wir für seine Hilfe.

Gliederung

1. Einleitung
2. Anatomie
3. Pathophysiologie des hinteren Kreuzbandes
 - 3.1. Funktion des hinteren Kreuzbandes als Stabilisator des Kniegelenkes
 - 3.2. Mechanismen der Verletzung des hinteren Kreuzbandes
 - 3.3. Messung der Bandspannung des hinteren Kreuzbandes
4. Versuchsaufbau
 - 4.1. Beschreibung der Präparation
 - 4.2. Beschreibung des Meßaufbaus
 - 4.2.1. Beschreibung des Winkelaufnehmers
 - 4.2.2. Beschreibung des Zugspannungsaufnehmers
5. Versuchsdurchführung
6. Ergebnisse
 - 6.1. Neutralstellung
 - 6.1.1. Anterolateraler Anteil
 - 6.1.2. Posteromedialer Anteil
 - 6.2. Innenrotation
 - 6.2.1. Anterolateraler Anteil
 - 6.2.2. Posteromedialer Anteil
 - 6.3. Außenrotation
 - 6.3.1. Anterolateraler Anteil
 - 6.3.2. Posteromedialer Anteil
 - 6.4. Hintere und vordere Schublade
 - 6.5. Abduktion und Adduktion
 - 6.6. Innenrotation bei Kniegelenksinstabilität
 - 6.6.1. Innenrotation bei medialen Bandverletzungen
 - 6.6.2. Innenrotation bei lateralen Bandverletzungen
 - 6.7. Außenrotation bei Kniegelenksinstabilität
 - 6.7.1. Außenrotation bei medialen Bandverletzungen
 - 6.7.2. Außenrotation bei lateralen Bandverletzungen
7. Auswertung und Diskussion
8. Kurven
9. Literaturverzeichnis



1. Einleitung

Das hintere Kreuzband wird in der Literatur weit weniger beachtet als das vordere Kreuzband, die Seitenbänder oder die Menisken. Kennedy und Grainger (1967) meinen, daß das hintere Kreuzband in vielen Abhandlungen als nebensächlich angesehen wird. Das größere Interesse an den übrigen Bändern erwecke den Anschein, als sei das hintere Kreuzband von untergeordneter Bedeutung.

Der Hauptgrund für diese Vernachlässigung ist vermutlich, daß das hintere Kreuzband bei Verletzungen des Kniegelenkes nicht so häufig betroffen ist wie das vordere Kreuzband oder das mediale Seitenband. An dem "West Virginia University Medical Center" wurden im Zeitraum von 1950 bis 1966 129 Verletzungen von Bändern des Knies operativ versorgt. Das vordere Kreuzband war 105 mal betroffen, das mediale Seitenband 62 mal, das hintere Kreuzband nur 10 mal, was einer Häufigkeit von 7,75 % aller Bandverletzungen entspricht (Pickett und Altizer 1971).

O'Donoghue (1955) berichtet über 80 Patienten, deren Bandverletzungen operiert wurden. In 58 Fällen lag ein Defekt des vorderen Kreuzbandes vor, in 52 Fällen einer des medialen Seitenbandes. Das hintere Kreuzband war 9 mal verletzt (11,25 %). Von 116 Patienten mit akuten Bandverletzungen des Knies, die an der Universität von Texas zwischen August 1977 und März 1979 behandelt wurden, hatten 24 (20,6 %) eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes (Clendenin, DeLee, Heckmann 1980).

Vermutlich ist allerdings die Zahl der wirklichen Verletzungen des hinteren Kreuzbandes höher, da viele Verletzungen übersehen oder falsch diagnostiziert werden (Trickey 1968). Insall und Hood (1982) fanden beispielsweise, daß vier von acht Patienten mit alten Verletzungen

des hinteren Kreuzbandes schon einmal erfolglos operiert worden waren, weil die Ursache der Instabilität des Knies nicht erkannt wurde.

Da die Anzahl der schweren Bandverletzungen des Kniegelenkes zunehmen, werden auch Verletzungen des hinteren Kreuzbandes häufiger. Verantwortlich dafür ist eine Zunahme der Sport- und Verkehrsunfälle. Besonders Sportarten, wie Fußball, Skifahren und American Football führen häufig zu Verletzungen des Knies. Wirth und Artmann (1975) schreiben, daß die Entwicklung des Skifahrens zum Breitensport und die von der Industrie in letzter Zeit angebotenen Skistiefel mit Fixierung des Sprunggelenkes bei ungenügender Sicherheit der Bindungen eine Zunahme der Kombinationsverletzungen des Kniegelenkes bewirkt habe. Auch der Fußballsport, die Anregung Ungeübter zur sportlichen Betätigung durch "Trimm-dich-Aktionen" und der in letzter Zeit immense Aufschwung des Motorradfahrens würden vermehrt Kniebinnenschäden zur Folge haben, wobei die Kreuzbandverletzungen in einem gewissen Grade als typisch anzusehen seien.

In Amerika treten viele Verletzungen des Knies beim Football auf. Im Jahre 1975 betrafen 84 % der Operationen bei Verletzungen von Footballspielern der Hochschulen in Oklahoma das Kniegelenk (Pritchett 1982). Slocum und Larson (1968) berichten über eine Serie von 76 Bandverletzungen mit Instabilität des Knies. 65 der Verletzungen waren Sportunfälle, 40 davon durch Football.

Die Verletzungen der Kniebänder gewinnen durch diese Entwicklung an Bedeutung. Besonders durch die Zunahme schwerer Kombinationsverletzungen ist auch das hintere Kreuzband häufiger betroffen, was bei der Diagnostik berücksichtigt werden muß. Augustine schrieb 1956 sogar, daß Verletzungen des hinteren Kreuzbandes früher zwar selten waren, heute aber genauso häufig wie die des vorderen Kreuzbandes seien.

Diese Meinung wird jedoch von keinem anderen Autor bestätigt.

Die Verletzung des hinteren Kreuzbandes wird nicht nur häufig übersehen, sondern auch oft in der Therapie vernachlässigt. Ursachen hierfür sind nach Ansicht von Meyers (1975) die geringe Erfahrung vieler Chirurgen mit Operationen des hinteren Kreuzbandes, der schwierige operative Zugang und die Auffassung, daß das hintere Kreuzband nicht zufriedenstellend operiert werden könne, oder daß eine konservative Therapie ausreichend sei. O'Donoghue (1955) notierte die Gründe, warum bei fünf Patienten trotz Diagnose einer Kreuzbandverletzung keine Operation durchgeführt wurde: zweimal wurde angegeben, die Operation sei wegen Substanzverlust des Bandes unmöglich. In den restlichen Fällen wurde erklärt, die Operation könne auch später durchgeführt werden, die Verletzung würde nicht gut heilen oder die Naht sei zu schwierig (der Patient hatte eine Ruptur des hinteren Kreuzbandes). Wirth und Artmann (1975) schätzten, daß bei Patienten mit Kreuzbandverletzungen und zusätzlichen Kniebinnenverletzungen an anderer Stelle in 30 % der Fälle eine Operation durchgeführt wird, ohne Berücksichtigung der Kreuzbandverletzung.

Entsteht durch Verletzung eine chronische Insuffizienz des hinteren Kreuzbandes, so hat dies für die Stabilität des Kniegelenkes schwerwiegende Folgen, da das hintere Kreuzband einer der Hauptstabilisatoren des Kniegelenkes ist (Augustine 1956, Kennedy, Grainger 1967, Hughston 1969). Darauf weist auch die Tatsache hin, daß das hintere Kreuzband doppelt so hohe Belastungen toleriert wie das vordere Kreuzband oder das mediale Seitenband (Kennedy, Hawkins, Willis, Danylchuk 1976). Hughston (1969) und Augustine (1956) betonen, daß ein Defekt des hinteren Kreuzbandes zu einer permanenten Instabilität des Knies führt. Zwar kann ein gut entwickelter Quadriceps die Insuffizienz des hinteren Kreuzbandes in einem gewissen

Ausmaß kompensieren, aber meist bleiben Symptome wie Schmerzen hinter der Patella, die durch die Dislokation der Tibia nach hinten vermehrt belastet wird, oder ein Gefühl der Instabilität und Unsicherheit, besonders beim Treppensteigen (Insall, Hood 1982). Sportler geben an, daß sie Schwierigkeiten hätten, beim Laufen plötzlich die Richtung zu ändern (Meyers 1975). O'Donoghue (1955) beobachtete den postoperativen Verlauf von frischen und älteren Bandverletzungen bei 54 Sportlern. 16 der 54 Sportler waren durch die Verletzung gezwungen, ihren Sport aufzugeben. Der Grund, der zu einer so großen Behinderung führte, war in 15 Fällen eine Kreuzbandverletzung. Ein Patient hatte eine generalisierte Synovitis. Eine Kreuzbandverletzung führt demnach zu einer stärkeren Beeinträchtigung als eine Verletzung der übrigen Bänder des Knies. O'Donoghue schreibt, daß Schmerzen, Steifheit, Schwäche oder laterale Instabilität, sofern sie nicht zu extrem sind, besser toleriert werden können als eine Instabilität durch Kreuzbandverletzung.

Neben der Unsicherheit ist die schwerwiegendste Folge der Instabilität des Knies die Entwicklung einer Arthrosis deformans. Lange (1957) fand eine Arthrose gehäuft bei Patienten mit älteren Bandverletzungen. In Fällen, bei denen frühzeitig nach Verletzung eine Operation durchgeführt wurde, konnte Lange bis zu 10 Jahren nach Operation keine Arthrose feststellen. Nur eine rechtzeitige Operation kann eine Arthrose verhindern, eine verspätete Operation vermag nur noch die Arthrose in ihrer Entwicklung aufzuhalten. Durch die Operation selbst wird nach Lange die Arthrosebildung nicht gefördert. Der präoperative Zustand des Gelenkes und das Ausmaß der Traumatisierung des Knorpels seien entscheidend für die Gefahr einer späteren Arthrose.

Die Notwendigkeit, eine Verletzung der Kreuzbänder möglichst frühzeitig zu operieren, wird belegt durch Versuche von Horwitz (1939) und O'Donoghue (1966).

Horwitz konnte am Kaninchen zeigen, daß ein rupturiertes Kreuzband auch bei langer Ruhigstellung nicht zusammenwächst, im Gegensatz zu den Seitenbändern, bei denen eine Heilung durch konservative Therapie möglich war. Die Gründe hierfür sind vermutlich die Gelenkflüssigkeit, der Erguß und die Retraktion des Bandes, die eine Vereinigung der Bandanteile verhindern. Vor allem ist eine lokalisierte Blutung mit Fibrinausscheidung, die später als Leitstruktur für das Einwachsen von Fibroblasten dienen kann, nicht möglich, da sich das Blut diffus in das Gelenk ergießt.

O'Donoghue zeigte an Hunden, daß nach Durchtrennung des vorderen Kreuzbandes auch nach längerer Ruhigstellung eine Heilung nicht auftritt. Resorption und Verkürzung der Bandanteile sind so ausgeprägt, daß eine Apposition der Bandenden schon zwei Wochen nach der Durchtrennung unmöglich ist. Im Gegensatz dazu konnte durch eine sofortige Bandnaht bei 30 Hunden in jedem Fall eine Heilung erzielt werden.

O'Donoghue (1955) kontrollierte den Erfolg von Operationen bei Bandverletzungen. Dazu teilte er die 80 Patienten, die er im Zeitraum von 1938 bis 1953 operiert hatte, in drei Gruppen auf. Zur Gruppe mit frühzeitiger Operation gehörten alle Patienten, die innerhalb der ersten zwei Wochen nach der Verletzung operiert wurden. Patienten mit aufgeschobener Operation wurden in einem Zeitraum von 2 Wochen bis 3 Monaten nach Verletzung operiert. Die dritte Gruppe bestand aus Patienten, bei denen eine Spätoperation erst durchgeführt wurde, nachdem die Bandverletzung schon mehr als 3 Monate bestand.

71 % der Patienten mit frühzeitiger Operation gaben an, nach der Operation keine Beschwerden mehr zu haben. Nur 40 % der Patienten mit aufgeschobener Operation und 50 % der Patienten mit Spätoperation waren beschwerdefrei. 53 % der Patienten, bei denen eine frühzeitige Operation

durchgeführt wurde, gaben an, daß das operierte Knie genauso gut sei wie das gesunde Knie. Von den Patienten, bei denen eine aufgeschobene oder späte Operation durchgeführt wurde, konnten dies nur 30 % bzw. 25 % bestätigen. Besonders aufschlußreich war die Untersuchung von Sportlern. Wurde die Operation frühzeitig vorgenommen, so konnten 89 % der Sportler ihre alte Sportart anschließend wieder ausüben. Bei Sportlern, deren Behandlung aufgeschoben wurde, konnten nur 64 % wieder aktiv werden. Wurde die Operation später als 3 Monate nach Verletzung vorgenommen, waren nur 40 % anschließend wieder in der Lage, ihre gewohnte sportliche Tätigkeit auszuüben.

O'Donoghue kommt aufgrund dieser Untersuchung zu dem Ergebnis, daß eine frühzeitige Operation eine *conditio sine qua non* für gute Resultate bei Bandverletzungen sei. Je früher die Operation durchgeführt wird, desto besser ist das Ergebnis.

Die Wiederherstellung der vollständigen Arbeits- und Sporttauglichkeit nach Bandverletzungen des Knies ist besonders wichtig, da sich die meisten Bandverletzungen am Knie in einem relativ frühen Lebensalter ereignen. Dies hängt mit den Unfallursachen wie Sport und Motorradfahren zusammen. Slocum und Larson (1968), die 76 Bandverletzungen des Knies beschrieben, errechneten, daß die Bandverletzungen am häufigsten bei Patienten im Alter von 17 bis 18 Jahren auftraten.

Clendenin, DeLee und Heckmann (1980) untersuchten 24 Verletzungen des hinteren Kreuzbandes. Das Durchschnittsalter der Patienten lag bei 24 Jahren. Pickett und Altizer (1971) beschrieben 129 Bandverletzungen des Knies. 76 % der Patienten waren jünger als 21 Jahre. O'Donoghue (1955) errechnete, daß von 80 Patienten 80 % jünger als 25 Jahre waren. 55 % waren jünger als 20 Jahre.

Zusammenfassend kann man feststellen, daß Verletzungen der Kreuzbänder häufiger werden und deshalb an Bedeutung gewinnen. Die beste Behandlung bei vollständiger Ruptur eines Kreuzbandes ist eine sofortige Operation. Deshalb ist es wichtig, eine Verletzung möglichst schnell und präzise zu diagnostizieren. Hierzu sind genaue Kenntnisse der Funktion und Verletzungsmechanismen der Bänder notwendig. In der vorliegenden Arbeit soll durch Messung der Bandspannung des hinteren Kreuzbandes in den verschiedenen Anteilen die Funktion des Bandes als Stabilisator des Kniegelenkes näher untersucht werden.

2. Anatomie

Das hintere Kreuzband entspringt von der Innenfläche des medialen Femurkondylus, zieht schräg nach hinten und inseriert in der Area intercondylaris posterior der Tibia. Im mittleren Anteil ist das hintere Kreuzband am schmalsten; nach oben und unten breiten sich die Fasern fächerförmig aus. Entsprechend den Ansatzstellen an Femur und Tibia lassen sich zwei funktionelle Einheiten unterscheiden, die anatomisch jedoch untrennbar miteinander verbunden sind: ein anterolateraler Anteil, der den Hauptteil des Bandes ausmacht, und ein kleinerer posteromedialer Anteil (Abb. 1).

Das hintere Kreuzband ist durchschnittlich 13 mm breit und 38 mm lang, und damit breiter und kräftiger als das vordere Kreuzband (Girgis, Marshall, AlMonajem 1975). Die Fasern des hinteren Kreuzbandes sind im Gegensatz zu denen des vorderen Kreuzbandes nicht spiralig verwunden. Die Bandspannung hängt also ausschließlich von der Veränderung der Distanz zwischen Femur und Tibia ab (Detenbeck 1974).

Hinter und vor dem hinteren Kreuzband können akzessorische Bänder liegen, die vom lateralen Meniskus zum medialen Femurkondylus ziehen. Das Ligamentum meniscofemorale posterius Wrisberg liegt hinter dem hinteren Kreuzband. Es kann einige Millimeter entfernt oder direkt über der Oberfläche des Kreuzbandes verlaufen. Meist kann das Ligamentum Wrisberg gut vom Kreuzband unterschieden werden (Abb. 1). Das Ligamentum meniscofemorale anterius Humphry liegt vor dem hinteren Kreuzband. Es steht meist in engem Kontakt mit dem Kreuzband und kann durch den synovialen Überzug manchmal übersehen werden. Die Stärke dieser akzessorischen Bänder schwankt. Sie können z.T. recht kräftig sein und dann wie ein drittes Kreuzband erscheinen.

Brantigan und Voshell untersuchten 1946 50 Kniee und fanden 30 mal ein Ligamentum Wrisberg und 17 mal ein Ligamentum Humphry. In drei Knieen waren beide Bänder vorhanden (Brantigan, Voshell 1946).

Das seltene Vorkommen dieser Bänder läßt vermuten, daß sie nur von untergeordneter Bedeutung sind (Girgis, Marshall, AlMonajem 1975). Sie ziehen das Hinterhorn des lateralen Meniskus entsprechend der Spannung des hinteren Kreuzbandes aus der Belastungszone, sind aber für die Gelenkfunktion selbst nicht wesentlich (Hertel 1980).

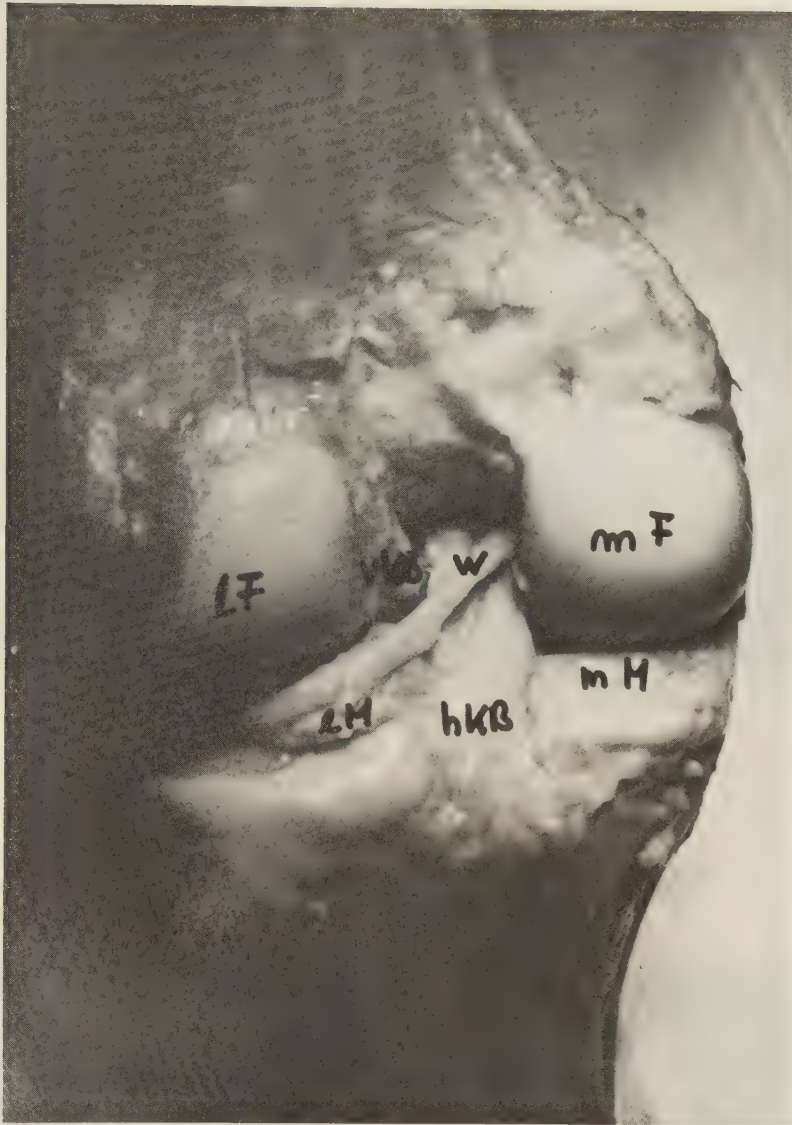


Abb. 1

Das hintere Kreuzband und das Lig. meniscomfemorale posterius Wrisberg .

lF : Lateraler Femurkondylus

mF : Medialer Femurkondylus

W : Lig. Wrisberg

hKB : Hinteres Kreuzband

vKB : Vorderes Kreuzband

lM : Lateraler Meniskus

mM : Medialer Meniskus



Abb. 2
Das hintere Kreuzband bei maximaler Streckung. Der antero-
laterale Anteil liegt oben.



Abb. 3
Das hintere Kreuzband bei ca 30° Beugung.



Abb. 4
Das hintere Kreuzband bei ca 90° Beugung.



Abb. 5
Das hintere Kreuzband bei ca 120° Beugung.



Abb. 6

Das hintere Kreuzband bei 180° Beugung. Eine solch starke Beugung ist bei intaktem Bandapparat und erhaltener Muskulatur nicht möglich.

3. Pathophysiologie des hinteren Kreuzbandes

Neben klinischen Beobachtungen bei Bandverletzungen des Kniegelenkes dienten hauptsächlich Leichenexperimente zur Untersuchung der Funktion der einzelnen Kniebänder. Solche Experimente wurden schon 1893 von Hönigschmied durchgeführt. Von der Methodik her lassen sich die seitdem durchgeführten Experimente in drei Gruppen unterteilen:

1. Bestimmte Bänder wurden durchtrennt und die dadurch entstandene Instabilität untersucht.
2. Verletzungsmechanismen wie Überstreckung, Rotation, Abduktion usw. wurden nachgeahmt und die resultierenden anatomischen Veränderungen beschrieben.
3. Durch direkte Messung der Bandspannung wurde versucht, Aufschluß über die Bandfunktion zu erhalten.

Auch bei diesen Experimenten zeigt sich, daß das hintere Kreuzband weit weniger beachtet wird als das vordere Kreuzband oder die Seitenbänder. Die Ergebnisse der Untersuchungen über das hintere Kreuzband sind z.T. ungenau oder widersprüchlich. Kennedy und Grainger (1967) meinen, daß man bei der genauen Durchsicht der Literatur über das hintere Kreuzband wegen des Fehlens akkurater Informationen wie vor den Kopf gestoßen sei.

Im folgenden Kapitel sollen die wesentlichen Ergebnisse bisheriger Untersuchungen über das hintere Kreuzband wiedergegeben werden.

3.1.

Funktion des hinteren Kreuzbandes als Stabilisator des Kniegelenkes

Die Hauptfunktion des hinteren Kreuzbandes besteht darin, eine Dislokation der Tibia nach hinten – eine sogenannte hintere Schublade – zu verhindern.

94 % der Kraft, die der hinteren Schublade bei 90 und 30 Grad Beugung entgegenwirkt, wird von dem hinteren Kreuzband aufgebracht (Butler, Noyes, Grood, Miller 1978).

Dies ist wesentlich, um das Verhältnis zwischen Abrollen und Gleiten der Femurkondylen bei Beugung und Streckung des Beines zu regulieren. Ohne das hintere Kreuzband würden die Femurkondylen bei Streckung unbegrenzt nach vorne rollen, und es käme zu einer Subluxation der Tibia nach hinten, die durch Muskelzug kompensiert werden müßte (Palmer 1938).

Bei Verletzung des hinteren Kreuzbandes entsteht eine Instabilität in anteroposteriorer Richtung. Dies wird klinisch durch die sogenannte hintere Schublade geprüft, d.h. die Tibia läßt sich bei gebeugtem Knie nach hinten verschieben. Solch eine Dislokation der Tibia nach hinten kann bei verletztem hinteren Kreuzband auch spontan eintreten, wenn der Patient mit angezogenen Beinen und rechtwinklig gebeugtem Knie im Bett liegt. In der englischsprachigen Literatur wird dies als "posterior sag sign" bezeichnet. Tritt die hintere Schublade spontan auf, besteht die Gefahr, daß irrtümlich eine vordere Schublade diagnostiziert wird, da die Tibia nun verstärkt nach vorn beweglich ist.

Wie groß die Instabilität in der anteroposterioren Richtung nach Verletzung des hinteren Kreuzbandes ist, zeigt ein Vergleich mit Verletzungen des vorderen Kreuz-

bandes. Hertel konnte an Leichenknien messen, daß durch eine isolierte Verletzung des vorderen Kreuzbandes die Tibia im Bereich der Eminentia intercondylica im Durchschnitt um 3,6 mm weiter nach ventral gezogen werden kann. Nach Verletzungen des hinteren Kreuzbandes dagegen kann die Tibia 14 mm weit nach hinten verschoben werden (Hertel 1980).

Die hintere Schublade ist das charakteristische Zeichen für eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes.

Hughston (1976) meint aber, daß nach akutem Riß des hinteren Kreuzbandes häufig keine vermehrte Verschieblichkeit der Tibia nach hinten nachweisbar sei, da die posterolaterale Kapsel einschl. des Ligamentum arcuatum unverletzt bleiben. In 14 von 18 Fällen mit akuter Verletzung des hinteren Kreuzbandes konnte nach Angaben von Hughston eine hintere Schublade nicht ausgelöst werden. Dagegen sei bei einer chronischen Insuffizienz des hinteren Kreuzbandes eine hintere Schublade immer nachweisbar.

Andere Autoren widersprechen den Beobachtungen von Hughston. Clendenin, DeLee und Heckmann (1980) meinen, daß eine hintere Schublade auch bei intakter hinterer Kapsel auftritt. Sie konnten bei 5 Patienten mit isolierter Verletzung des hinteren Kreuzbandes und vollständig intakter hinterer Kapsel in allen Fällen eine vermehrte Beweglichkeit der Tibia nach hinten feststellen.

Hertel (1980) fand bei Leichenexperimenten, daß eine isolierte hintere Kreuzbandverletzung immer zu einer ausgeprägten hinteren Instabilität führt.

Die Rolle des hinteren Kreuzbandes als Stabilisator gegen eine Überstreckung des Kniegelenkes wird unterschiedlich beurteilt. Einige Autoren sind der Meinung, daß hauptsächlich das vordere Kreuzband vor einer zu starken Über-

streckung schützen würde. Girgis, Marshall und AlMonajem (1975) durchtrennten an Leichenpräparaten das vordere Kreuzband und stellten fest, daß eine vermehrte Überstreckung von 25 Grad möglich war. Eine Durchtrennung des hinteren Kreuzbandes beeinflusste die Überstreckung nicht. Sie zogen daraus den Schluß, daß das hintere Kreuzband nur dann die Streckung limitiert, wenn das vordere Kreuzband defekt ist.

Hughston (1976) meint, daß nach akuter Bandverletzung eine Zunahme der Rekurvation eher für eine Verletzung des vorderen Kreuzbandes als für eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes spricht. Er konnte bei 7 Patienten mit defektem hinteren Kreuzband und intaktem vorderen Kreuzband nur in einem Fall eine vermehrte Rekurvation feststellen.

Clendenin, DeLee und Heckmann (1980) untersuchten 10 Patienten mit isolierter Ruptur des hinteren Kreuzbandes und konnten bei zwei Patienten eine Zunahme der Überstreckbarkeit von mehr als 5 ° gegenüber der gesunden Seite feststellen.

Nach Verletzung der medialen oder lateralen Kollateralbänder werden beide Kreuzbänder zu Valgus- bzw. Varusstabilisatoren. Nach Ansicht von Hertel und Schweiberer (1975) zeigen alle Valgus- und Varusinstabilitäten über 25 mm eine Kreuzbandläsion an. Hertel (1980) trennte schrittweise zunächst das Innenband und die mediale Kapsel, dann die dorsomediale Kapsel und zuletzt das hintere Kreuzband durch. Dabei nahm die Aufklappbarkeit des medialen Gelenkspaltes kontinuierlich zu. Die stärkste Zunahme der medialen Instabilität wurde durch die Verletzung des hinteren Kreuzbandes bewirkt. Der gleiche Versuch wurde auf der lateralen Seite durchgeführt. Nacheinander wurden das Außenband, die dorsolaterale Kapsel und das hintere Kreuzband durchtrennt. Die stärkste Zunahme der lateralen Aufklappbarkeit wurde wiederum durch die Verletzung des hinteren Kreuzbandes bewirkt. Die laterale Instabilität war aber noch größer, wenn statt des hinteren das vordere Kreuz-

band durchtrennt wurde. Hertel folgert daraus, daß das hintere Kreuzband eine stärkere Valgusstabilisierung und das vordere Kreuzband eine stärkere Varusstabilisierung gewährleistet. Daraus ergibt sich, daß nach Verletzung des medialen Seitenbandes hauptsächlich das hintere Kreuzband eine weitere mediale Instabilität verhindert. Die anatomischen Verhältnisse sprechen für die Richtigkeit der Versuchsergebnisse. Das hintere Kreuzband setzt am medialen Femurkondylus an und müßte demnach bei einer Vergrößerung des Spaltes zwischen medialem Femurkondylus und der Tibia stärker unter Zug geraten als das vordere Kreuzband, das am lateralen Femurkondylus befestigt ist. Demnach müßte das hintere Kreuzband bei einem Valgustrauma eher reißen als das vordere Kreuzband. Die Praxis zeigt jedoch, daß das vordere Kreuzband bei medialen Zerreißungen weit häufiger mitverletzt ist als das hintere Kreuzband. Dies ist nach Ansicht von Hertel und Schweiberer (1975) durch die meist ebenfalls vorhandene Außenrotationskomponente bedingt. Hönigschmied (1893) fand bei gerader Valgusbelastung immer eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes. Besonders stark ist die Valgusstabilisierung des hinteren Kreuzbandes bei voller Streckung. Kennedy und Fowler (1971) durchtrennten bei einem Knie das mediale Seitenband, die mediale Kapsel und das vordere Kreuzband. Dennoch trat bei voller Streckung durch die stabilisierende Wirkung des hinteren Kreuzbandes nur eine minimale mediale Instabilität auf. Hughston (1976) meint, daß eine mediale Instabilität bei voll gestrecktem Knie ein zuverlässigerer Indikator für eine akute Verletzung des hinteren Kreuzbandes sei als die hintere Schublade. Slocum und Larson (1968) kommen zu dem Ergebnis, daß bei gestrecktem Knie solange keine Valgusinstabilität auftreten könne, wie das hintere Kreuzband und die hintere Kapsel intakt seien.

Die Funktion des medialen Seitenbandes kann demnach nicht bei voll gestrecktem Knie untersucht werden. Die meisten Autoren empfehlen, das Knie bei 20° bis 30° Beugung zu

untersuchen (Abbott, Saunders, Bost, Anderson 1944; Brantigan, Voshell 1941; Horwitz 1938; Hughston, Andrews, Cross, Moschi 1976; Kennedy, Fowler 1971; Slocum, Larson 1968; Hertel 1980). In dieser Stellung führt auch die alleinige Ruptur des medialen Seitenbandes zu einer vermehrten Instabilität.

Die Funktion der Kreuzbänder bei Rotationsbewegungen ist nach Ansicht der meisten Autoren das Resultat ihrer anatomischen Lage zueinander. Bei Innenrotation wickeln sich die Kreuzbänder umeinander und limitieren dadurch die Bewegungen. Bei Außenrotation entwinden sie sich und werden locker (Brantigan, Voshell 1941; Horwitz 1938; Kennedy, Grainger 1967; Slocum, Larson 1968). Horwitz (1938) entfernte bei Knieen sämtliche Bänder, außer den Kreuzbändern. Danach war eine unbehinderte Außenrotation von 180° möglich. Die Innenrotation war jedoch durch die Anspannung der Kreuzbänder auf 15° begrenzt. Die Anspannung des hinteren Kreuzbandes bei Innenrotation ist nicht nur das Resultat des Zusammenspiels mit dem vorderen Kreuzband. Entscheidend für das Verhalten der Kreuzbänder bei Rotationsbewegungen ist die Lage der Achse, um die sich Femur und Tibia drehen. Nach Untersuchungen von Shaw, Eng und Murray (1974) verläuft diese Achse bei intaktem Knie durch das Tuberculum intercondylare mediale der Tibia.

Bei Innenrotation der Tibia bewegt sich der mediale Femurkondylus nach vorn, der laterale nach hinten. Dadurch wird der Abstand zwischen der Hinterfläche der Tibia und dem medialen Femurkondylus vergrößert, und das hintere Kreuzband spannt sich (Palmer 1938). Bei Verletzungen verändert sich die Achse der Rotationsbewegungen durch die entstehende Instabilität. Hughston (1976) ist der Ansicht, daß nach Verletzungen anderer Bänder das hintere Kreuzband als Hauptstabilisator die neue Achse bildet, um die die Tibia rotiert. Deshalb seien auch alle Instabilitäten, die auftreten, solange das hintere Kreuzband intakt ist,

Rotationsinstabilitäten. Gerade Instabilitäten wie vordere und hintere Schubladenbewegungen und seitliche Aufklappbarkeit könnten nur entstehen, wenn das hintere Kreuzband defekt ist.

Diese Ansicht wird von den anderen Autoren nicht geteilt. Ihrer Ansicht nach ist die Verlagerung der Rotationsachse bei Verletzungen abhängig von der Art der Verletzung. Bei einer Verletzung des medialen Kapselbandapparates kommt es durch die mediale Instabilität zu einer vermehrten Beweglichkeit des medialen Femurkondylus. Es entsteht eine anteromediale Instabilität, wenn der mediale Femurkondylus nach vorn subluxieren kann, oder eine posteromediale Instabilität, wenn der mediale Femurkondylus nach hinten subluxieren kann. Die Rotationsachse wandert dabei auf die laterale Seite, deren intakter Bandapparat eine vermehrte Beweglichkeit verhindert. Umgekehrt verhält sich das Knie bei lateralen Bandverletzungen. Hier entstehen, je nachdem in welcher Richtung die Beweglichkeit des lateralen Femurkondylus vergrößert ist, anterolaterale oder posterolaterale Instabilitäten. Die Rotationsachse verlagert sich zur stabileren medialen Seite. Bei Bandverletzungen des Kniegelenkes wandert also die Achse, um die die Rotationsbewegungen erfolgen, von der verletzten, instabilen Seite zur intakten, stabilen Seite des Gelenkes (Hertel, Schweiberer 1975; Müller 1975).

Die Verlagerung der Rotationsachse bei Bandverletzungen beeinflusst die Funktion der Kreuzbänder. Hertel (1980) untersuchte das Ausmaß der Rotationsbewegung bei verschiedenen Bandverletzungen. Er kam zu dem Ergebnis, daß das hintere Kreuzband bei medialer Instabilität vor übermäßiger Innenrotation schützt und bei lateraler Instabilität vor übermäßiger Außenrotation. Das vordere Kreuzband verhält sich genau umgekehrt.

Entsprechend diesen Ergebnissen müßte sich das hintere Kreuzband bei Verletzungen des medialen Bandapparates anspannen, wenn die Tibia innenrotiert wird und dem Kniegelenk vermehrte Stabilität verleiht. Dies ist im Fall der vorderen Schublade untersucht worden.

Die vordere Schublade ist nach Ansicht von Hughston (1976) meist keine Verlagerung der gesamten Tibia nach vorn, sondern eine Rotationsinstabilität. Sie wird am häufigsten durch eine Zerreißung der medialen Kapsel ausgelöst. Die Subluxation des medialen Tibiaplateaus nach vorn imponiert dabei als vordere Schublade. Eine Ruptur des vorderen Kreuzbandes verstärkt die Rotationsschublade. Ist das hintere Kreuzband intakt, so kann die vordere Schublade durch Innenrotation verhindert werden (Hughston, Andrews, Cross, Moschi 1976; Slocum, Larson 1968; Hertel, Schweiberer 1975; Hertel 1980). Slocum und Larson (1968) untersuchten 76 Patienten mit rotatorischer Instabilität aufgrund einer Verletzung der medialen Kapsel, des medialen Seitenbandes oder des vorderen Kreuzbandes. Das hintere Kreuzband war stets intakt. Bis auf vier Fälle ließ sich bei allen Patienten eine vordere Schublade nachweisen. Die vordere Schublade verschwand, sobald das Knie bei 30° Innenrotation untersucht wurde. Bei Außenrotation von 15° war die vordere Schublade immer größer als in Neutralposition. Solange das hintere Kreuzband intakt ist, wird demnach das Knie durch Innenrotation stabilisiert. Die Außenrotation verstärkt die Instabilität. Hughston (1976) folgert daraus, daß eine vordere Schublade, die durch Innenrotation nicht beeinflußt werden kann, ein Indikator für ein defektes hinteres Kreuzband ist.

Die Valgusinstabilität nach medialer Kapsel-Bandverletzung kann nach Angaben von Slocum und Larson (1968) ebenfalls durch Innenrotation verringert werden. Das Bein befindet sich normalerweise in leichter Außenrotation, wenn der Patient sitzt oder im Bett liegt. In dieser Position wird

dann auch der Valgus-Stress-Test zur Überprüfung der medialen Bandstabilität vorgenommen. Ein positives Testergebnis bedeutet nicht nur eine reine Valgusinstabilität, sondern beinhaltet auch eine gewisse rotatorische Instabilität. Wenn der Valgus-Stress-Test nicht bei außenrotierter Tibia sondern bei Innenrotation vorgenommen wird, verringert sich das Ausmaß der medialen Instabilität drastisch.

Zusammenfassend kann man demnach feststellen, daß bei medialen Bandläsionen das Ausmaß der entstandenen Instabilität durch Innenrotation herabgesetzt werden kann. Dies liegt an der starken Anspannung des hinteren Kreuzbandes.

3.2.

Mechanismen der Verletzung des hinteren Kreuzbandes

Das hintere Kreuzband wird meist im Rahmen schwerer Kombinationsverletzungen des Bandapparates des Kniegelenkes verletzt. Hughston (1969) schreibt, daß die Schwere der Verletzung und nicht der Mechanismus entscheidend dafür sei, ob das hintere Kreuzband reißt oder nicht. Isolierte Verletzungen des hinteren Kreuzbandes sind seltener. O'Donoghue (1955) beschrieb 88 Bandverletzungen des Knies, die operativ behandelt wurden. Die Kreuzbänder waren in 62 Fällen betroffen, davon aber nur drei isolierte Verletzungen des hinteren Kreuzbandes; das entspricht 3,6 %. Palmer (1938) berichtet von 21 Verletzungen der Kreuzbänder, wobei das hintere Kreuzband nur 4 mal isoliert betroffen war. McMaster (1975) konnte an der Universität von Kalifornien innerhalb von vier Jahren nur 3 mal eine isolierte Ruptur des hinteren Kreuzbandes ohne begleitende Verletzung der hinteren Kapsel feststellen.

Als Hauptursache für Verletzungen des hinteren Kreuzbandes wird von vielen Autoren eine gewaltsame Dislokation der Tibia nach hinten bei gebeugtem Knie angesehen (Abbott,

Saunders, Bost, Anderson 1944; Clendenin, DeLee, Heckmann 1980; Palmer 1938; Trickey 1968). Durch einen Schlag von vorn auf das Oberteil der Tibia kommt es zu einem Riß des hinteren Kreuzbandes. Ein Hinweis auf diese Verletzung sind Abschürfungen oder Platzwunden an der Vorderseite der Tibia (Trickey 1968).

Trickey (1968) berichtet über eine Serie von 17 isolierten Verletzungen des hinteren Kreuzbandes. Als Verletzungsmechanismus nimmt er in allen Fällen einen Stoß auf die Tibia nach hinten bei gebeugtem Knie an. Die Tatsache, daß das Knie während des Stoßes gebeugt war, läßt sich gut aus den Verletzungsursachen herleiten. In 12 Fällen trat die Verletzung bei einem Motorradunfall auf, in 4 Fällen war die Ursache ein Autounfall, bei dem die Patienten mit gebeugtem Knie gegen das Armaturenbrett geschleudert wurden (dashboard-injury). Eine Verletzung war Folge eines Fahrradunfalls. In allen Fällen fand man das hintere Kreuzband am tibialen Ansatz ausgerissen; in 13 Fällen zusammen mit einem Knochenfragment.

Clendenin, DeLee, Heckmann beschrieben 1980 zehn Fälle mit Verletzungen des hinteren Kreuzbandes, von denen in neun Fällen die Verletzung durch Druck der Tibia nach hinten bei gebeugtem Knie entstand. Die Ursachen waren Autounfälle bei fünf Patienten, Motorradunfälle bei zwei Patienten und Sturz auf das gebeugte Knie bei zwei Patienten. In einem Fall erlitt ein Patient eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes durch Überstreckung.

Kennedy und Grainger (1967) nehmen an, daß hauptsächlich zwei Mechanismen für Verletzungen des hinteren Kreuzbandes verantwortlich sind:

1. Eine gewaltsame Dislokation der Tibia nach hinten bei gebeugtem Knie.
2. Eine Überstreckung des Kniegelenkes.

Kennedy und Grainger versuchten beide Verletzungsmechanismen experimentell nachzuvollziehen. In einer ersten Versuchsserie wurde die Tibia bei einer Beugung des Kniegelenkes von 45° nach hinten gedrückt. In 12 Fällen führte dieser Versuch zu einer Fraktur der Tibia oder des Femur, ohne Verletzung des hinteren Kreuzbandes. Nur in einem einzigen Fall riß das hintere Kreuzband.

Eine Erklärung dafür, daß Kennedy und Grainger den Verletzungsmechanismus nicht darstellen konnten, bietet eine Untersuchung von Jonasch (1957). Er konnte nachweisen, daß Bandverletzungen nur bei plötzlicher Beanspruchung auftreten, daß langsame Belastungen dagegen zu Brüchen des Knochens führen. Die physikalische Erklärung dafür ist nach Ansicht von Jonasch darin zu suchen, daß bei plötzlicher Beanspruchung Zugkräfte auftreten, die größer sind, als die Reißfestigkeit des Bandes. Diese wird momentan überschritten, ohne daß sich die wirkenden Kräfte bis zu den Ansatzstellen am Knochen fortpflanzen können. Bei langsamer Beanspruchung hingegen kommt es zu einer vollen Belastung des Knochens.

Die Art der Verletzung ist demnach nicht nur von der Stärke der Belastung abhängig, die auf das Kniegelenk einwirkt, sondern auch von der Geschwindigkeit, mit der sie auftritt. Wenn ein Skifahrer stürzt, weil sich sein Fuß an einem Hindernis verfangen hat, so führt die Trägheit des Körpers, der in die ursprüngliche Bewegungsrichtung fällt, zu der Verletzung. Die Belastung des Knies beim Sturz entspricht dabei nicht dem Körpergewicht des Skifahrers, sondern vielmehr der negativen Beschleunigung, welche die Bewegung des Skifahrers abbremst. Normalerweise dauert ein Sturz weniger als eine Sekunde. Nimmt man an, daß das Gewicht des Skifahrers 70 kg und die Geschwindigkeit vor dem Sturz 40 km/h sei, so entsteht eine Kraft von 7698 Newton (= 785 kg), die zur Verletzung des Knies führt. Diese Kraft kann durch Hebelwirkung noch verstärkt werden (Palmer 1938).

Solche extremen, plötzlichen Belastungen wurden von Kennedy und Grainger in ihrem Experiment nicht berücksichtigt. Sie zogen die Tibia mit Hilfe einer Maschine nach hinten, wobei sie kontinuierlich die Stärke der Dislokation maßen. Dies mag die Ursache dafür sein, daß sie die Verletzung des hinteren Kreuzbandes nicht experimentell nachvollziehen konnten.

In einer zweiten Versuchsserie versuchten Kennedy und Grainger, Verletzungen des hinteren Kreuzbandes durch Überstreckung zu erzeugen. Dabei kam es regelmäßig zuerst zu einem Riß der hinteren Kapsel, gefolgt von einer Ruptur des hinteren Kreuzbandes. Kennedy und Grainger schreiben, daß ein Ausriß des hinteren Kreuzbandes am tibialen Ansatz ein so konstantes Ergebnis ihrer Überstreckungsversuche gewesen sei, daß die Überstreckung als Hauptursache für diese Verletzungen angesehen werden müsse.

Palmer (1938), der ebenfalls die Auswirkung gewaltsamer Überstreckung an Leichenknien untersuchte, kommt zu ganz anderen Ergebnissen. Seiner Ansicht nach bleibt das hintere Kreuzband praktisch immer intakt und auch die hintere Kapsel in ihrer Kontinuität erhalten. Die Hauptverletzung, die eine Überstreckung bewirkt, sei eine Ruptur des vorderen Kreuzbandes.

3.3.

Messung der Bandspannung des hinteren Kreuzbandes

Die meisten Untersuchungen über die Spannung der Kreuzbänder basieren auf einfacher Beobachtung oder Palpation der Bänder (Abbott, Saunders, Bost, Anderson 1944; Brantigan, Voshell 1941; Hughston 1969; Last 1948; Palmer 1938). Als indirekte Methode zur Ermittlung der Bandspannung wurde von einigen Autoren der Abstand zwischen Ursprung und Ansatz der Kreuzbänder gemessen (Girgis, Marshall, AlMonajem 1975; Horwitz 1938).

Wang, Walker und Wolf (1973) haben die Ansatzstellen der Kreuzbänder mit Nägeln markiert und danach im Röntgenbild die Distanz zwischen Ursprung und Ansatz bei verschiedenen Bewegungen des Knies gemessen (Wang, Walker 1973). In den letzten Jahren wurden komplizierte technische Verfahren zur Ermittlung der Bandspannung eingesetzt. Detenbeck (1974) versuchte, die Spannung durch direkten Zug am Band zu ermitteln. Er maß die Kraft, die notwendig war, das Band eine definierte Strecke weit aus seiner ursprünglichen Position herauszuziehen. Küsswetter und Wirth (1978) verwendeten Dehnungsmeßstreifen, die auf einen Transducer aufgebracht und mit Kirchmairnähten in das Band genäht wurden. Hertel (1980) versuchte die Bandspannung mit Hilfe eines Fadens zu ermitteln, der am Kreuzband befestigt war und von diesem in rechtem Winkel wegführte. Unter Zug wurde mit Hilfe einer Meßvorrichtung die seitliche Auslenkung des Kreuzbandes ermittelt. Die seitliche Auslenkung wurde als Maß für die Bandspannung betrachtet.

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse bisheriger Arbeiten über die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes aufgelistet werden:

Horwitz (1938):

Die Spannung des hinteren Kreuzbandes nimmt bei Beugung im größeren anterioren Anteil zu. Im kleineren posterioren Anteil des hinteren Kreuzbandes sind die Fasern nie so stark gespannt wie die übrigen Fasern. Sie werden nur bei Streckung und gleichzeitiger Innenrotation relativ gespannt.

Palmer (1938):

In Streckung ist der posteriore Anteil des hinteren Kreuzbandes gespannt. Sobald die Beugung beginnt, spannt sich der größere anteriore Anteil des Bandes und bleibt während der gesamten Beugung gespannt.

Brantigan, Voshell (1941):

Die Kreuzbänder sind bei Streckung und Beugung gespannt. Die Spannung ist relativ größer bei voller Beugung.

Abbott, Saunders (1944):

Die langen, hinteren Fasern des hinteren Kreuzbandes sind gespannt bei Streckung. Während der Beugung sind immer einige Fasern des hinteren Kreuzbandes gespannt. Die Zone, in der das Kreuzband gespannt ist, verlagert sich bei Beugung von hinten nach vorn.

Last (1948):

Die Kreuzbänder sind in keiner Position des Kniegelenkes völlig locker. Das hintere Kreuzband ist stärker gespannt bei Beugung.

Hughston (1969):

Eine demonstrierbare Anspannung liegt vor bei allen Graden von Beugung und Streckung. Die Spannung steigt bei Innenrotation.

Wang, Walker (1973):

Das hintere Kreuzband lockert sich bis 30° Beugung und bleibt dann bis zu voller Beugung nahezu konstant gespannt.

Detenbeck (1974):

Das hintere Kreuzband ist gespannt bei voller Streckung, lockert sich bis zu einer Beugung von 30° und wird danach wieder fester.

Girgis, Marshall, AlMonajem (1975):

Der anterolaterale Anteil, der den größten Anteil des hinteren Kreuzbandes ausmacht, ist in Streckung locker

und spannt sich bei einer Beugung von mehr als 30° . Nur der kleinere posteromediale Anteil wird bei Beugung locker.

Küsswetter, Wirth (1978):

Das hintere Kreuzband zeigt unabhängig von verschiedenen Bewegungen immer einen gleichbleibenden Spannungszustand.

Hertel (1980):

Der anterolaterale Anteil des hinteren Kreuzbandes ist fest bei Streckung. Er lockert sich bis zu einer Beugung von 30° , wird danach wieder fest bis 80° Beugung, lockert sich dann wieder, um bei einer Beugung von mehr als 140° wieder fester zu werden. Der posteromediale Anteil ist fest bei Streckung. Er lockert sich bis zu einem Minimum bei 30° und gerät unter zunehmender Beugung wieder unter Spannung. Die Spannung des hinteren Kreuzbandes verstärkt sich bei Innenrotation und hinterer Schublade.

4. Versuchsaufbau

In unserem Versuch wurde die Spannung des hinteren Kreuzbandes mit Hilfe eines Dehnungsmeßstreifens gemessen. Da die direkte Fixierung des Dehnungsmeßstreifens auf dem Kreuzband mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, wurde die Spannung indirekt ermittelt. Durch Bohrkanäle in Femur und Tibia wurden zwei dünne Dexon-Fäden gezogen, die genau im Faserverlauf der zwei Anteile des hinteren Kreuzbandes lagen. Diese Fäden fixierten wir an der Außenseite des Femur. Das andere Ende der Fäden wurde über eine Spiralfeder und ein Plastikplättchen, auf das der Dehnungsmeßstreifen aufgeklebt war, an der Tibia befestigt. Bei Bewegung des Knies verändert sich der Abstand zwischen Ursprung und Ansatz des hinteren Kreuzbandes. Die Fäden ziehen mit einer Kraft, welche der Abstandsänderung proportional ist, an der Feder. Die Veränderung der Zug-

spannung wurde von dem Dehnungsmeßstreifen gemessen. Durch diesen Versuchsaufbau kann eine direkte Fixierung des Dehnungsmeßstreifens am Kreuzband, die technisch sehr schwierig ist, umgangen werden.

Unser Versuchsaufbau basiert auf der Überlegung, daß die Bewegung der Ansatzpunkte entscheidend für die Spannung des hinteren Kreuzbandes ist. Detenbeck untersuchte 1974 das hintere Kreuzband und fand, daß die Fasern des hinteren Kreuzbandes nicht spiralig verwunden sind, sondern gerade vom Ursprung zum Ansatz verlaufen. Hieraus folgte er, daß die Bandspannung nur von der Veränderung der Distanz zwischen Femur und Tibia abhängt.

Ein Vorteil unseres Versuchsaufbaus ist, daß weder Muskulatur noch Bänder bei der Präparation entfernt werden mußten. Die hintere Kapsel wurde zwar eröffnet, um den Zugang zum hinteren Kreuzband zu ermöglichen, anschließend aber wieder sorgfältig vernäht. Dadurch entstand keine Instabilität, die das Meßergebnis hätte beeinflussen können.

4.1.

Beschreibung der Präparation

Wir präparierten das hintere Kreuzband von der Kniekehle her. Zunächst wurden die beiden Köpfe des M.gastrocnemius mobilisiert und zur Seite geschoben, so daß die hintere Kapsel freigelegt war (Abb. 7). Das Caput mediale des M.gastrocnemius wurde teilweise von seinem Ansatz am medialen Femurkondylus abgetrennt, um den Einblick zu verbessern. Nachdem die hintere Kapsel und das Ligamentum popliteum obliquum vollständig freigelegt waren, wurden sie durch einen Längsschnitt zertrennt. Das darunterliegende Fettgewebe wurde vollständig entfernt, um das hintere Kreuzband darzustellen (Abb. 8). Soweit ein

Ligamentum meniscofemorale posterius Wrisberg vorhanden war, wurde es herausgetrennt, da es für die Stabilität des Kniegelenkes nicht von Bedeutung ist (Girgis, Marshall, AlMonajem 1975; Hertel 1980 - Abb. 9). Das hintere Kreuzband wurde sorgfältig von seinem Ursprung am Femur bis zum Ansatz an der Tibia freipräpariert, um den Faserverlauf sichtbar zu machen (Abb. 10). Dann bohrten wir in Höhe des Ansatz der anterioren Fasern und der posterioren Fasern je einen Kanal durch den medialen Femurkondylus (Abb. 11, 12). Durch diese Knochenkanäle wurden zwei Dexon-Fäden gezogen, die wir an der Vorderseite des Femurs an zwei Metallringe knoteten, um ein Zurückrutschen zu verhindern (Abb. 13).

An der Tibia liegt der Ansatz des hinteren Kreuzbandes so weit dorsal, daß die Rückfläche der Tibia durch eine Metallplatte abgesichert werden mußte, um ein Absplittern des Knochens zu verhindern. Erst danach konnten zwei Kanäle durch die Tibia gebohrt werden: einer medial und einer lateral (Abb. 14). Um ein besseres Gleiten des Fadens in den Knochenkanälen zu ermöglichen, schoben wir dünne Redon-Drainageschläuche in die Kanäle (Abb. 15). Durch diese Schläuche wurden die Fäden, die nun schon an der Vorderseite des Femur verankert waren, gezogen. Der eine Faden lag genau im anterolateralen Anteil und der andere im posteromedialen Anteil des hinteren Kreuzbandes (Abb. 16). Anschließend wurde die hintere Kapsel wieder sorgfältig vernäht, um die Stabilität des Gelenkes nicht zu verändern (Abb. 17). In die Tibia kitteten wir mit Palacos einen Metallstab ein, an den der Dehnungsmeßstreifen und eine Feder gehängt werden konnte. Zum Zweck der Messung verbanden wir das freie Ende eines Fadens unter Vorspannung mit dem Dehnungsmeßstreifen und der Tibia. Bei jeder Bewegung des Knies zog der Faden nun mit einer Kraft, die der augenblicklichen Länge des hinteren Kreuzbandes entsprach, an der Feder und dem Dehnungsmeßstreifen. Bei der Messung wurde das Knie mit dem Femur und der Tischplatte verankert. Um die Tibia besser be-

wegen zu können, schraubten wir zwei senkrecht zueinanderstehende Metallplatten auf die Tibia. Mit Hilfe dieses Metallkreuzes konnten wir das Knie beugen, strecken und die Tibia nach innen oder außen drehen. Um eine Schubladenbewegung ausführen zu können, schraubten wir einen Griff an die Kondylen der Tibia. Mit diesem Griff konnte die Tibia nach vorn oder nach hinten gezogen werden (Abb. 18).

4.2.

Beschreibung des Meßaufbaus

Der Meßaufbau dient zur qualitativen Erfassung der mechanischen Zugspannung des hinteren Kreuzbandes in direkter Abhängigkeit von der Winkelstellung des Knies. Die Meßgenauigkeit ist nur wenig entscheidend, da keine exakten Meßgrößen für die Bandspannung gemessen werden, sondern nur ermittelt werden soll, ob das hintere Kreuzband relativ locker oder relativ gespannt ist, je nachdem in welcher Winkelstellung sich das Knie befindet.

Der Meßaufbau bedient sich der Verfahren der elektrischen Meßtechnik. Er besteht aus:

- einem Winkelaufnehmer
- einem Zugspannungsaufnehmer
- einem x-y-Schreiber.

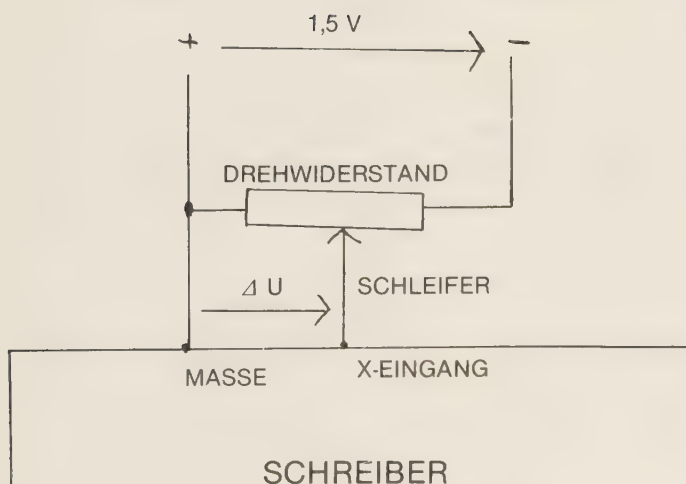
Mit der Apparatur wird die Funktion der Zugspannung in Abhängigkeit der Winkelstellung graphisch durch einen x-y-Schreiber dargestellt. Der x-y-Schreiber besitzt zwei unabhängige Eingänge: einen x-Eingang für horizontale Ablenkung und einen y-Eingang für vertikale Ablenkung. Wenn zwei elektrische Signale an je einem Eingang liegen, so zeichnet der Schreiber die Funktion $y=f(x)$ auf ein Blatt Papier.

Bei unserem Versuchsaufbau ist das Signal der Winkelstellung an dem x-Eingang und das der Zugspannung am y-Eingang angeschlossen.

4.2.1.

Beschreibung des Winkelaufnehmers

An dem Kniegelenk ist über einen mechanischen Aufbau ein Drehwiderstand installiert (Abb. 19). Der Schleifer des Drehwiderstandes dreht sich, wenn das Knie gestreckt oder gebeugt wird. Durch die Drehung des Schleifers wird der elektrische Widerstand verändert. Die Änderung des Widerstandes bewirkt eine proportionale elektrische Spannungsänderung (ΔU). Die Spannungsänderung wird registriert durch die Bewegung des Tintenzeichners des x-y-Schreibers in der horizontalen Richtung des Koordinatenfeldes. Die elektrische Schaltung des Winkelaufnehmers ist hier dargestellt:



Bei dieser Schaltung handelt es sich um einen Spannungsteiler. Mit der Änderung der Position des Schleifers an den Drehwiderstand kommt es zu einer proportionalen Spannungsänderung ΔU . Die Spannung kann je nach Position des Schleifers einen Wert zwischen 0 und + 1,5 Volt annehmen.

4.2.2.

Beschreibung des Zugspannungsaufnehmers

Die Spannung des hinteren Kreuzbandes wird indirekt gemessen. In den Bandverlauf wurde ein Faden präpariert, der über eine Spiralfeder an einem Plastikplättchen befestigt ist. Auf das Plastikplättchen wurde ein Dehnungsmeßstreifen geklebt. Ein Dehnungsmeßstreifen ist ein auf dünner Folie aufgebrachter Meßwiderstand. Wird dieser Dehnungsmeßstreifen durch Zug des Fadens an dem Plastikplättchen gedehnt, so verändert er proportional zu der Längenänderung seinen elektrischen Widerstand. Diese Widerstandsänderung wird über eine elektrische Meßbrücke in ein proportionales elektrisches Spannungssignal umgeformt. Die Spannungsänderungen bewirken am x-y-Schreiber eine Positionsveränderung des Tintenzeichners in vertikaler Richtung (Abb. 20 zeigt den Aufbau der gesamten Meßapparatur).

Die prinzipielle Schaltung besteht aus zwei Spannungsteilern. Sie arbeitet nach dem Prinzip der Wheatstonschen Meßbrücke.

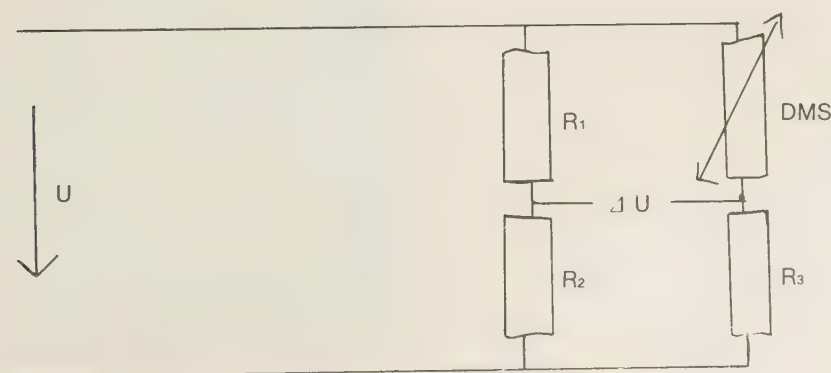




Abb. 7

Freilegung der hinteren Kapsel. Das Lig. popliteum obliquum ist in Bildmitte deutlich zu sehen.



Abb. 8

Das hintere Kreuzband mit dem Lig. Wrisberg.

mF = medialer Femurkondylus

lF = Lateraler Femurkondylus



Abb. 9

Entfernung des Lig. menisco-
femorale posterius Wrisberg.



Abb. 10

Das hintere Kreuzband nach
vollständiger Präparation.



Abb. 11

Bohren des Knochenkanals durch den medialen Femurkondylus. Die Bohrspitze liegt im anterolateralen Anteil des hinteren Kreuzbandes.

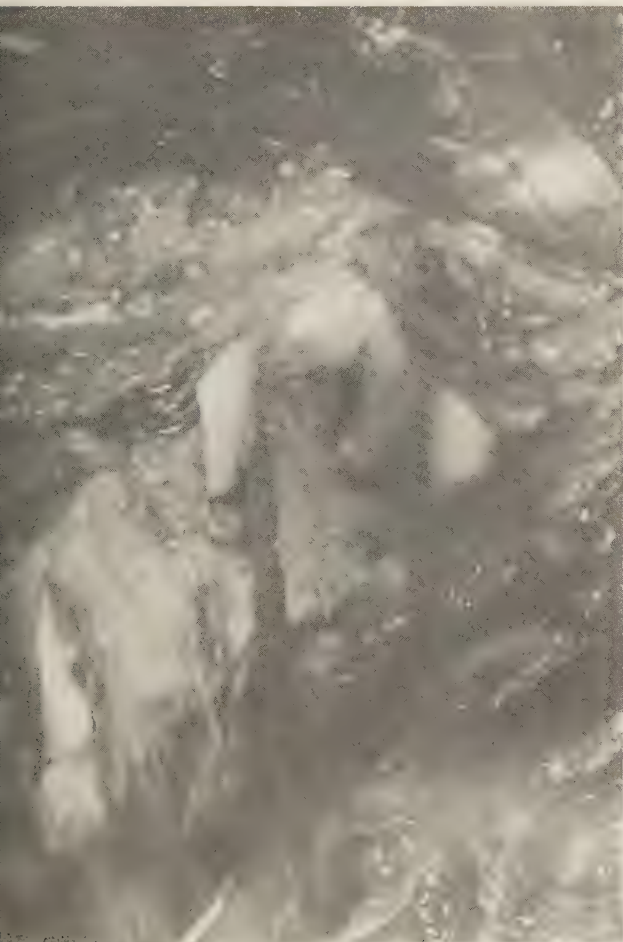


Abb. 12

Bohren des Knochenkanals durch den medialen Femurkondylus. Die Bohrspitze liegt im posteromedialen Anteil des hinteren Kreuzbandes.



Abb. 13

Befestigen der Fäden an
der Vorderfläche des
medialen Femurkondylus.



Abb. 14

Bohren des Knochenkanals
durch die Rückfläche der
Tibia. Um ein Absplittern
des Knochens zu verhindern,
wurde vorher eine Metall-
platte aufgeschraubt.

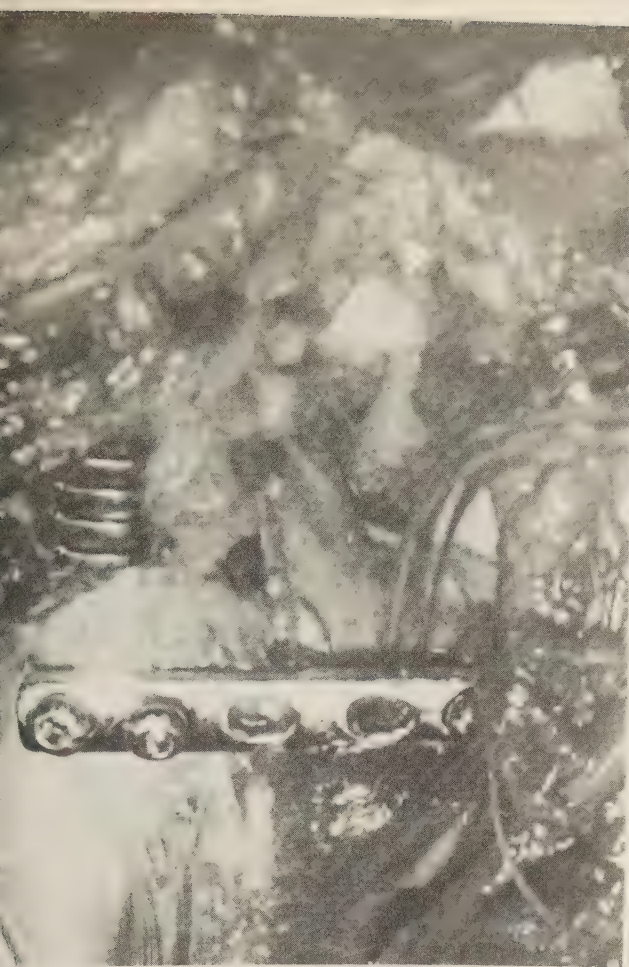


Abb. 15

Einfügen eines Plastikschlauchs in den lateralen Knochenkanal der Tibia. Der Faden im posteromedialen Bandanteil ist bereits durch die Knochenkanäle in Femur und Tibia gezogen worden.



Abb. 16

Lage der beiden Fäden nach vollständiger Präparation.

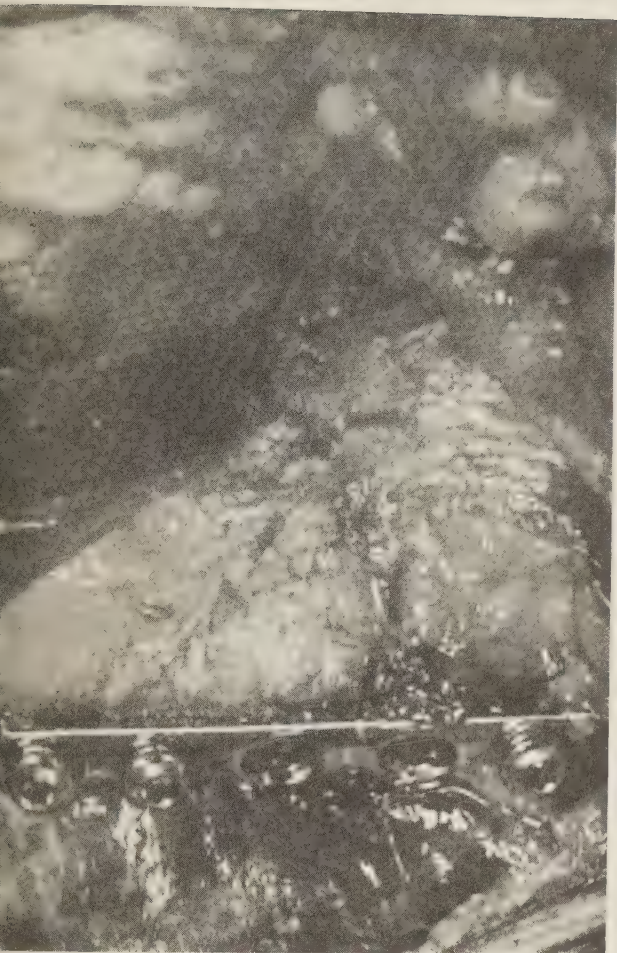


Abb. 17

Die hintere Kapsel wurde
nach der Präparation wieder
genäht.



Abb. 18

DMS = Dehnungsmeßstreifen

F = Spiralfeder

HG = Handgriff zum Bewegen des Kniegelenks

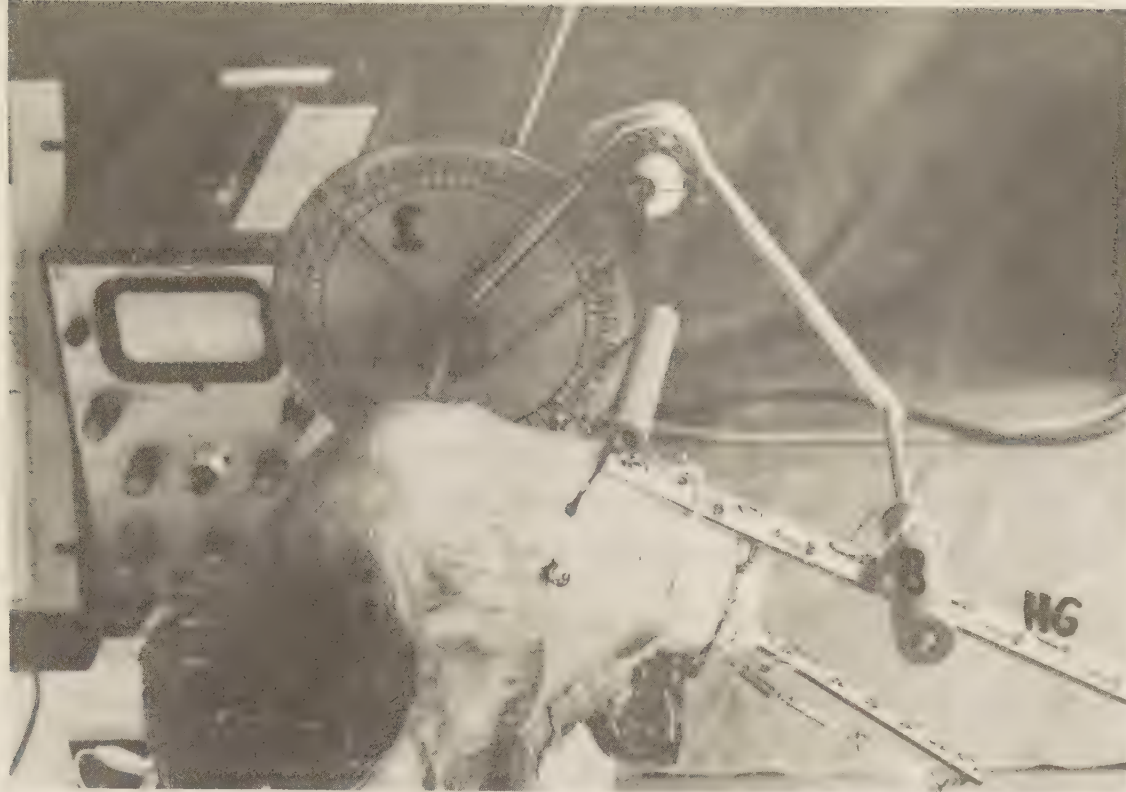


Abb. 19
 Aufbau zur Messung der Winkelstellung. Der Bügel (B) bewegt sich zusammen mit dem Handgriff (HG). Der Winkel wird vom Drehwiderstand (P) gemessen. Die Scheibe (S) dient zum Ablesen des Winkels.

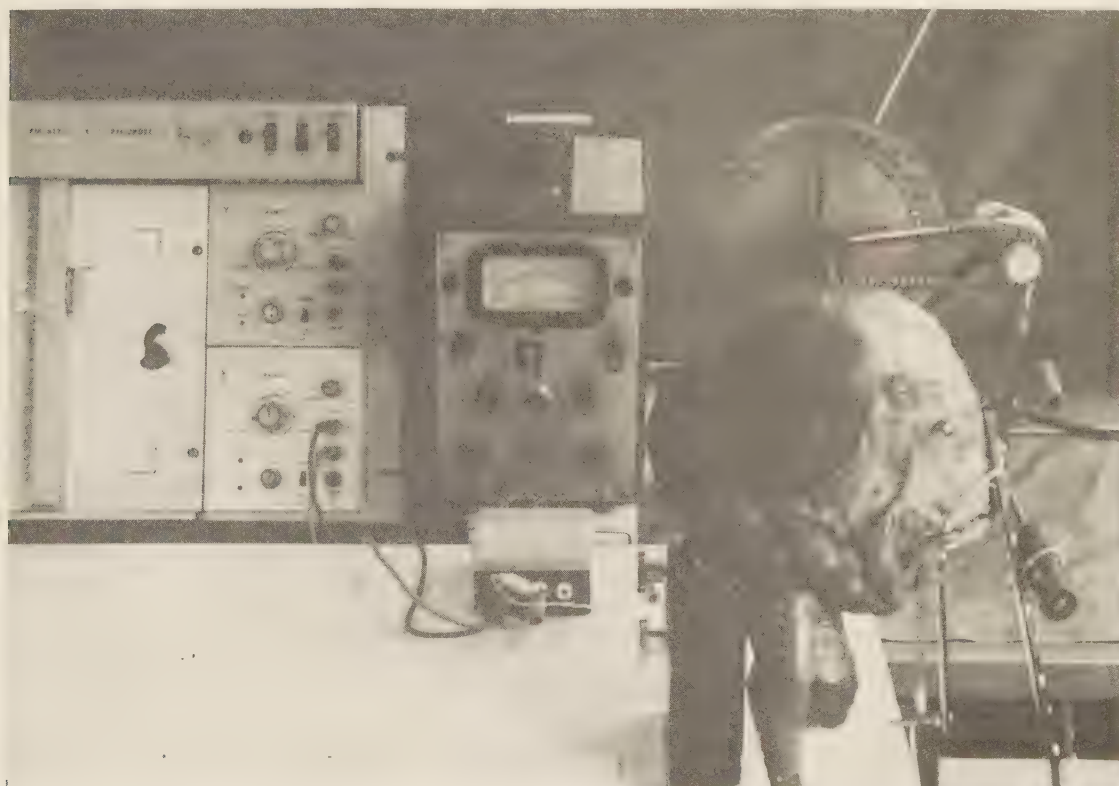


Abb. 20
 Der gesamte Meßaufbau.
 S = X-y-Schreiber
 A = Anzeigegerät mit Meßbrücke

5. Versuchsdurchführung

Im ersten Teil des Versuchs wurde bei acht Knieen die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes in Neutralstellung, bei Innen- und Außenrotation, bei vorderer und hinterer Schubladenbelastung und bei Ab- und Adduktion gemessen. Als Untersuchungsmaterial dienten frisch entnommene, unfixierte menschliche Kniegelenke. Bis zum Zeitpunkt der Präparation wurden die Kniegelenke kurzfristig tiefgefroren.

Im zweiten Teil des Versuchs wurden bei zwei Knieen mediale und laterale Bandverletzung simuliert und anschließend Messungen bei Innen- und Außenrotation vorgenommen. Dabei sollte die Auswirkung der Verlagerung der Rotationsachse beim instabilen Knie untersucht werden. Beim ersten Knie wurden die Bandstrukturen der medialen Seite in folgender Reihenfolge durchtrennt:

1. Oberflächliche und tiefe Schicht des medialen Seitenbandes
2. Dorsomediale Kapsel
3. Vorderes Kreuzband

In einem vierten Schritt wurde der mediale Meniskus entfernt.

Beim zweiten Knie wurden die Bandstrukturen der lateralen Seite in folgender Reihenfolge durchtrennt:

1. Laterales Seitenband
2. Dorsolaterale Kapsel
3. Vorderes Kreuzband

Zusätzlich wurde der laterale Meniskus entfernt.

Der zweite Teil des Versuchs war mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Als Bezug zeichneten wir zunächst die Kurven für das intakte Knie auf. Danach wurde die Banddurchtrennung vorgenommen und die Papierbögen mit den zuvor gezeichneten Kurven erneut in den x-y-Schreiber eingelegt, um die Kurve für das defekte Knie aufzuzeichnen. Dabei konnte es zu Ungenauigkeiten kommen, wenn das Papier nicht exakt in der gleichen Position fixiert wurde, wie beim Zeichnen der zuvor registrierten Kurven.

Weil durch die Zertrennung anderer Bänder die Zugspannung am hinteren Kreuzband stärker ansteigen konnte als beim normalen Knie, durften die Impulse des Dehnungsmeßstreifens nur gering verstärkt werden. Sonst hätte die Gefahr bestanden, daß die Auslenkung des x-y-Schreibers so groß geworden wäre, daß die Kurve nicht mehr auf dem Blatt Papier hätte registriert werden können. Wegen dieser geringen Verstärkung sieht der Kurvenverlauf insgesamt flacher aus als bei den Kurven, die im ersten Teil des Versuchs registriert wurden. Durch den flachen Kurvenverlauf wirkt sich die Ungenauigkeit, die durch das doppelte Einlegen der Papierbögen in den x-y-Schreiber entstand, verstärkt aus.

Diese Meßungenauigkeiten müssen im zweiten Teil des Versuchs einkalkuliert werden. Sie beeinflussen die Meßergebnisse aber nicht in einer Weise, die eine Aussage über das prinzipielle Verhalten des hinteren Kreuzbandes bei medialen oder lateralen Bandverletzungen unmöglich macht. Dies erklärt sich daraus, daß das Ergebnis unserer Versuche nicht aus exakten Meßgrößen, die die genaue Zugspannung des hinteren Kreuzbandes wiedergeben, besteht. Sinn der Kurven ist es, eine Aussage über die relativen Spannungsunterschiede zu ermöglichen. Wie stark ein Anteil des hinteren Kreuzbandes in einer bestimmten Position des Knies gespannt ist, kann aus unseren Versuchen nicht hervorgehen. Unsere Versuchsergebnisse zeigen aber beispielsweise, ob die Spannung größer bei Beugung oder bei Streckung ist.

Der Versuchsaufbau gestattet demnach eine qualitative und keine quantitative Messung. Die relativen Bandspannungsänderungen sind auf den gezeichneten Kurven gut zu erkennen und zu bewerten.

6. Ergebnisse

6.1. Neutralstellung

6.1.1. Anterolateraler Anteil (Kurven 1-8)

Der anterolaterale Anteil ist in Streckung gespannt. Mit Beginn der Beugung lockert er sich bis zu einem Minimum bei 10° - 20° . Anschließend steigt die Bandspannung wieder. Er bleibt fest in einem Bereich von 40° - 90° und lockert sich erst wieder bei starker Beugung.

6.1.2. Posteromedialer Anteil (Kurven 9-16)

Der posteromediale Anteil des hinteren Kreuzbandes ist bei Streckung ebenfalls gespannt. Er wird locker bei 10° - 20° Beugung und erreicht anschließend mit zunehmender Beugung sein Spannungsmaximum.

6.2. Innenrotation

6.2.1. Anterolateraler Anteil (Kurven 1-8)

Die Kurven 1-4 zeigen, daß dieser Bandanteil während des gesamten Verlaufs der Beugung durch Innenrotation zusätzlich gespannt wird, sonst aber dem Verlauf der Normalbeugung entspricht. In den Kurven 5-8 wird durch Innenrotation die Bandspannung durch Beugung des Knies zwischen 40° und 50° herabgesetzt. In allen übrigen Positionen jedoch wird die Bandspannung wie bei den übrigen Kurven durch Innenrotation verstärkt.

- 6.2.2. Posteromedialer Anteil (Kurven 9-16)
Durch Innenrotation wird die Spannung des posteromedialen Anteils in allen Graden von Beugung und Streckung gegenüber der Normalkurve heraufgesetzt.
- 6.3. Außenrotation
- 6.3.1. Anterolateraler Anteil (Kurven 1-8)
Die Bandspannung des anterolateralen Anteils wird bei Streckung und leichter Beugung durch Außenrotation herabgesetzt. Bei Beugung von mehr als 50° wird die Spannung durch Außenrotation verstärkt. In den Kurven 7 + 8 ist die Bandspannung, die bei Beugung von mehr als 30° durch Außenrotation bewirkt wird, sogar größer als die Bandspannung durch Innenrotation.
- 6.3.2. Posteromedialer Anteil (Kurven 9-16)
Ist das Knie bis zu einer Winkelstellung von durchschnittlich 80° gebeugt oder gestreckt, so wird die Spannung des posteromedialen Anteils durch Außenrotation herabgesetzt. Bei Beugung von mehr als 80° verstärkt die Außenrotation die Bandspannung.
- 6.4. Hintere und vordere Schublade (Kurven 17-21)
Durch eine hintere Schubladenbelastung werden beide Anteile des hinteren Kreuzbandes verstärkt angespannt. Die vordere Schublade verringert die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes bei intaktem vorderen Kreuzband nur unwesentlich.
- 6.5. Abduktion und Adduktion (Kurven 22-23)
Sowohl Ab- als auch Adduktion bewirken eine vermehrte Bandspannung beider Anteile des hinteren Kreuzbandes. In Streckung ist die Spannung durch

Abduktion größer als durch Adduktion. Bei Beugung von mehr als 20° ist im anterolateralen Anteil die Bandspannung durch Adduktion größer als durch Abduktion. Dies gilt für den postero-medialen Anteil bei Beugung von mehr als 40° .

6.6. Innenrotation bei Kniegelenksinstabilität

6.6.1. Innenrotation bei medialen Bandverletzungen (Kurven 24-31)

Im anterolateralen Anteil des hinteren Kreuzbandes verändert sich durch die Instabilität die Spannung bei Innenrotation nur unwesentlich gegenüber dem unverletzten Knie. Die Bandspannung des posteromedialen Anteils wird dagegen durch Innenrotation verstärkt, wenn eine mediale Instabilität besteht.

6.6.2. Innenrotation bei lateralen Bandverletzungen (Kurven 40-47)

In beiden Bandanteilen ist keine wesentliche Veränderung der Bandspannung bei Innenrotation durch die laterale Instabilität festzustellen.

6.7. Außenrotation bei Kniegelenksinstabilitäten

6.7.1. Außenrotation bei medialen Bandverletzungen (Kurven 32-39)

Durch Außenrotation kommt es zu einer starken Lockerung beider Anteile des hinteren Kreuzbandes, wenn eine mediale Instabilität besteht.

6.7.2. Außenrotation bei lateralen Bandverletzungen (Kurven 48-55)

Besteht eine laterale Bandverletzung, so wird die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes bei Außenrotation heraufgesetzt. Das gilt besonders für den anterolateralen Anteil.

7. Auswertung und Diskussion

Die wesentlichen Ergebnisse unserer Untersuchung des hinteren Kreuzbandes sind:

1. Beide Anteile des hinteren Kreuzbandes sind bei Streckung gespannt.
2. Bei Beugung von 10° - 20° lockern sich beide Anteile des hinteren Kreuzbandes.
3. Der anterolaterale Anteil des hinteren Kreuzbandes stabilisiert das Kniegelenk in einem Bereich von 40° - 90° Beugung.
4. Bei starker Beugung ist der anterolaterale Anteil des hinteren Kreuzbandes locker, der posteromediale Anteil gespannt.
5. Innenrotation verstärkt die Spannung beider Anteil des hinteren Kreuzbandes. (In vier Fällen konnte dies für den anterolateralen Anteil bei einer Winkelstellung des Knies zwischen 40° bis 50° nicht nachgewiesen werden).
6. In Streckung bewirkt Außenrotation eine Abnahme der Bandspannung. Bei Beugung von mehr als 50° wird die Spannung des anterolateralen Anteils heraufgesetzt, bei Beugung von mehr als 80° auch die Spannung des posteromedialen Anteils.
7. Die hintere Schublade verstärkt die Spannung des hinteren Kreuzbandes. Durch die vordere Schublade wird die Spannung des hinteren Kreuzbandes bei intaktem vorderen Kreuzband kaum beeinflusst.

8. Ab- und Adduktion bewirken eine vermehrte Bandspannung. In Streckung ist die Spannung durch Abduktion größer als durch Adduktion. Bei Beugung dreht sich das Verhältnis um.
9. Bei medialer Instabilität stabilisiert das hintere Kreuzband die Innenrotation durch vermehrte Anspannung des posteromedialen Anteils. Durch Außenrotation lockert sich das hintere Kreuzband sehr stark, wenn eine mediale Instabilität besteht.
10. Bei lateraler Instabilität stabilisiert das hintere Kreuzband die Außenrotation durch vermehrte Anspannung besonders im anterolateralen Anteil.

Die Versuchsergebnisse belegen die Funktion des hinteren Kreuzbandes als zentralen Stabilisator des Kniegelenkes. Fast alle Bewegungen bewirken eine Spannungszunahme in bestimmten Anteilen des hinteren Kreuzbandes. Hierdurch kann das hintere Kreuzband das Knie bei Streckung und Beugung, bei Innenrotation und Außenrotation des gebeugten Knies, bei Ab- und Adduktion und bei hinterer Schubladenbelastung stabilisieren. Hertel (1980) betont, daß die Anspannung des anterolateralen Anteils bei einer Winkelstellung des Knies zwischen 40° + 90° besonders wichtig ist, da alle anderen Bänder in dieser Stellung entspannt sind, und deshalb, neben der Muskulatur, allein das hintere Kreuzband dem Kniegelenk Stabilität verleiht.

Relativ locker sind alle Fasern des hinteren Kreuzbandes nur bei leichter Beugung von 10° - 20° und bei Außenrotation, wenn das Knie nicht mehr als 50° gebeugt ist. Eine vordere Schubladenbelastung verringert die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes nur unwesentlich, solange das vordere Kreuzband intakt ist.

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß bei Druck der Tibia nach hinten im Sinne einer hinteren Schublade das hintere Kreuzband in allen Positionen des Kniegelenks eindeutig stärker angespannt wird. Dies belegt, daß das hintere Kreuzband der entscheidende Schutz gegen eine Dislokation der Tibia nach hinten ist. Ob auch noch andere Bänder, besonders die hintere Kapsel, einer hinteren Schublade entgegenwirken können, läßt sich allein aus unseren Ergebnissen nicht ableiten. Die Tatsache, daß das hintere Kreuzband das kräftigste Band im Kniegelenk ist (Kennedy, Hawkins, Willis, Danylchuk 1976), läßt aber vermuten, daß bei Ruptur des hinteren Kreuzbandes eine Instabilität des Kniegelenks in anteroposteriorer Richtung entsteht.

Unsere Messungen haben ergeben, daß beide Anteile des hinteren Kreuzbandes bei Streckung des Knies gespannt sind. Bei Überstreckung nimmt die Spannung noch weiter zu. Dies zeigt, daß das hintere Kreuzband ein wichtiger Schutz gegen Überstreckung ist. Ob das vordere Kreuzband ebenfalls die Überstreckung des Knies limitiert (Girgis, Marshall, AlMonajem 1975; Hughston 1976), kann aus unseren Versuchsergebnissen nicht abgeleitet werden. Die Versuche von Kennedy und Grainger (1967), die zeigen konnten, daß bei abrupter Überstreckung des Kniegelenks regelmässig das hintere Kreuzband an seinem tibialen Ansatz ausriß, belegen ebenfalls die Wirksamkeit des hinteren Kreuzbandes als Stabilisator bei übermäßiger Streckung des Knies.

Eine Abduktion im Kniegelenk führt nach unseren Versuchen zu einer Spannungszunahme des hinteren Kreuzbandes. Diese Spannungszunahme ist besonders ausgeprägt bei gestrecktem Bein. Dies bedeutet, daß das hintere Kreuzband besonders bei Streckung ein wirkungsvoller Valgusstabilisator ist. Daraus folgt, daß eine mediale

Instabilität bei gestrecktem Knie eher für eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes als des medialen Seitenbandes spricht (Hughston 1976, Slocum, Larson 1968). Die Funktion des medialen Seitenbandes kann also nicht bei voller Streckung im Kniegelenk untersucht werden. Nach unseren Versuchsergebnissen empfiehlt es sich, die Prüfung des medialen Seitenbandes bei leichter Beugung von ca. 20° durchzuführen, da in dieser Stellung beide Anteile des hinteren Kreuzbandes relativ locker sind. Dieses Ergebnis unserer Untersuchungen entspricht den Empfehlungen vieler Autoren (Abbott, Saunders, Bost, Anderson 1944; Brantigan, Voshell 1941; Horwitz 1938; Hughston, Andrews, Cross, Moschi 1976; Kennedy, Fowler 1971; Slocum, Larson 1968; Hertel 1980).

Nach unseren Meßergebnissen stabilisiert das hintere Kreuzband nicht nur die Abduktion sondern auch die Adduktion. Bei gestrecktem Knie stabilisiert das hintere Kreuzband die Abduktion mehr als die Adduktion, bei gebeugtem Knie die Adduktion mehr als die Abduktion. Nach Ansicht von Hertel (1980) ist das hintere Kreuzband für die Stabilisierung der Adduktion nicht so wichtig wie das vordere Kreuzband.

Bei Innenrotation verstärkt sich die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes in beiden Anteilen bei allen Winkelstellungen des Kniegelenkes. Die Ursache für diese Anspannung ist nach Ansicht vieler Autoren die Lage der Kreuzbänder zueinander, die bewirkt, daß die Kreuzbänder sich bei Innenrotation umeinander wickeln (Brantigan, Voshell 1941, Horwitz 1938; Kennedy, Grainger 1967; Slocum Larson 1968). Im Gegensatz dazu entwinden sich die Kreuzbänder bei Außenrotation. Eine Abnahme der Bandspannung des hinteren Kreuzbandes bei Außenrotation tritt nach unseren Versuchen aber nur bei gestrecktem Knie auf. Bei gebeugtem Knie bewirkt die Außenrotation ebenfalls eine Zunahme der Bandspannung

des hinteren Kreuzbandes.

Bei Bandverletzungen auf der medialen oder lateralen Seite verlagert sich die Achse bei Rotationsbewegungen. Dadurch verändert sich die Funktion des hinteren Kreuzbandes. Bei medialen Bandverletzungen spannt sich das hintere Kreuzband durch Innenrotation, bei lateralen durch Außenrotation. Diese Versuchsergebnisse entsprechen den Untersuchungen von Hertel (1980). Die Tatsache, daß durch Außenrotation bei medialer Instabilität eine starke Lockerung des hinteren Kreuzbandes erfolgt, erklärt, warum das hintere Kreuzband bei Abduktion und gleichzeitiger Außenrotation – einem häufigen Verletzungsmechanismus – nach Ruptur des medialen Seitenbandes nur relativ selten reißt.

Die Ergebnisse unserer Versuche bestätigen also, wie oben dargelegt, die meisten Untersuchungen über die Funktion des hinteren Kreuzbandes. Wesentlich schwieriger ist der Vergleich unserer Ergebnisse mit anderen Arbeiten, in denen versucht wurde, die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes direkt zu messen. Bei Vergleich der Meßergebnisse entsteht eine große Verwirrung über die Widersprüchlichkeit der Angaben. Die Ursache dieser Ungenauigkeiten liegt nach unserer Meinung in den Untersuchungsmethoden, die meist keine exakte Messung zuließen. Die meisten Untersuchungen basieren auf einfacher Beobachtung oder Palpation der Bänder (siehe Abschnitt 3.3.). Die Ungenauigkeiten bei dieser Methode entstehen durch die komplizierte anatomische Lage der Kreuzbänder. Die Kreuzbänder liegen im Innern des Kniegelenks und entziehen sich daher der direkten Beobachtung unter normalen anatomischen Bedingungen. Erst wenn andere Bänder und die Gelenkkapsel entfernt werden, kann man die Kreuzbänder sehen. Häufig wurde bei den anatomischen Untersuchungen zusätzlich ein Femurkondylus entfernt, um das Kreuzband vollständig freizulegen. Durch diese

Präparation wird das Knie gänzlich instabil, und die Funktion der Kreuzbänder unter normalen Bedingungen kann nur ungenau ermittelt werden.

Wir führten diese Präparation ebenfalls durch. Die Abbildungen 2-6 zeigen das hintere Kreuzband bei verschiedenen Graden von Beugung. Eine Aussage über die Spannung der verschiedenen Kreuzbandanteile ist dabei nicht möglich.

Detenbeck (1974) nennt als weitere Ursachen für die widersprüchlichen Ergebnisse bisheriger Untersuchungen den synovialen Überzug der Kreuzbänder, der eine direkte Beobachtung unmöglich macht, solange er nicht vollständig entfernt wurde.

Wang, Walker und Wolf (1973) markierten die Ansatzstellen des hinteren Kreuzbandes mit Nägeln und maßen danach röntgenologisch die Abstände zwischen den Nägeln. Sie fanden heraus, daß sich das hintere Kreuzband bis 30° Beugung lockert und dann bis zur vollen Beugung nahezu konstant gespannt bleibt. Ihnen entging die Erschlaffung des anterolateralen Anteils bei voller Beugung ebenso wie die gleichzeitige Zunahme der Spannung des posteromedialen Anteils. Unserer Meinung nach ist dies auf die Ungenauigkeiten zurückzuführen, die durch Projektionsfehler bei der röntgenologischen Darstellung entstehen.

Detenbeck (1974) versuchte, die Spannung des hinteren Kreuzbandes durch direkten Zug am Band zu bestimmen. Er kam zu dem Ergebnis, daß das hintere Kreuzband bei Streckung gespannt ist, sich bei 30° Beugung lockert und bei weiterer Beugung wieder anspannt. Dies entspricht exakt unseren Ergebnissen über den posteromedialen Anteil des hinteren Kreuzbandes. Das davon unterschiedliche Verhalten des anterolateralen Anteils

scheint Detenbeck entgangen zu sein.

Der Versuch von Küsswetter und Wirth (1978), die Bandspannung mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen zu ermitteln, führte zu keinem Ergebnis. Bei allen Bewegungen des Kniegelenks zeigte der Dehnungsmeßstreifen einen gleichbleibenden Spannungszustand des hinteren Kreuzbandes an. Die Ursache liegt vermutlich in den Schwierigkeiten, den Dehnungsmeßstreifen direkt auf dem Kreuzband zu befestigen. Außerdem wurden mit dem aufgenähten Meßstreifen vermutlich beide Bandanteile des hinteren Kreuzbandes gleichzeitig erfaßt.

Am besten stimmen unsere Ergebnisse mit denen von Hertel (1980) überein. Abweichend von unseren Resultaten meint Hertel, daß der anterolaterale Anteil des hinteren Kreuzbandes sich bei Beugung von mehr als 140° wieder spannt. Wir sind der Ansicht, daß dieses Ergebnis durch den unterschiedlichen Versuchsaufbau entsteht. Hertel entfernte vor der Messung die gesamte Muskulatur des Knies. Dies wiederum verändert die Mechanik bei starker Beugung. Normalerweise limitiert die Muskulatur als Kissen zwischen Femur und Tibia die Beugung. Wird die Muskulatur entfernt, so kann das Knie um 10° - 15° weiter gebeugt werden. Dann wird die Beugung erst durch das Aufeinandertreffen der Knochen begrenzt (Brantigan, Voshell 1941). Eine so starke Beugung, wie Hertel sie an seinem Präparat durchführen konnte, ist demnach unter normalen Bedingungen unserer Meinung nach nicht möglich. Zusätzlich kann nicht ausgeschlossen werden, daß das Einklemmen des Muskelkissens zwischen Tibia und Femur bei Überbeugung einen Einfluß auf die Bänder des Kniegelenkes hat. Deshalb meinen wir, daß die Ergebnisse von Hertel nicht auf das Knie mit vollständig erhaltener Muskulatur übertragen werden dürfen. Die Abb. 6 zeigt das Verhalten des hinteren Kreuzbandes bei Überbeugung. Man kann gut erkennen, daß sich der anterolaterale Anteil um den Femurkondylus wickelt und dadurch erneut unter Zug-

spannung gerät. Eine so starke Beugung, wie in Abb. 6 dargestellt, ist bei intaktem Bandapparat und erhaltener Muskulatur nun nicht möglich.

Alle übrigen Angaben von Hertel über die Bandspannung des hinteren Kreuzbandes bei Innenrotation, Außenrotation und Schubladenbelastung bestätigen unsere Versuchsergebnisse.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß unsere Versuchsergebnisse die Wichtigkeit des hinteren Kreuzbandes für die Stabilität des Kniegelenks zeigen. Das hintere Kreuzband verleiht dem Kniegelenk bei fast allen Bewegungen Festigkeit. Daher ist ein intaktes hinteres Kreuzband entscheidend für die Funktion des Kniegelenks. Eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes muß demnach zu einer beträchtlichen Instabilität führen und auf Dauer schwerwiegende Veränderungen im Kniegelenk bewirken. Es ist daher entscheidend eine Verletzung des hinteren Kreuzbandes frühzeitig zu erkennen und zu therapieren. Charakteristische Zeichen einer Verletzung des hinteren Kreuzbandes sind eine mediale Instabilität bei voller Streckung und eine hintere Schublade. Die beste Therapie einer vollständigen Ruptur des hinteren Kreuzbandes ist, wie im ersten Kapitel dargelegt, eine direkte Operation. Nur durch eine sofortige Operation lassen sich Spätfolgen einer Verletzung des hinteren Kreuzbandes, wie Unsicherheit beim Laufen und arthrotische Veränderungen des Kniegelenks, vermeiden.

8. Kurven

Zeichenerklärung :

NS = Neutralstellung

IR = Innenrotation

AR = Außenrotation

HS = Hintere Schublade

VS = Vordere Schublade

Abd. = Abduktion

Add. = Adduktion

Verl.= Bandspannung nach Durchtrennung best. Bänder

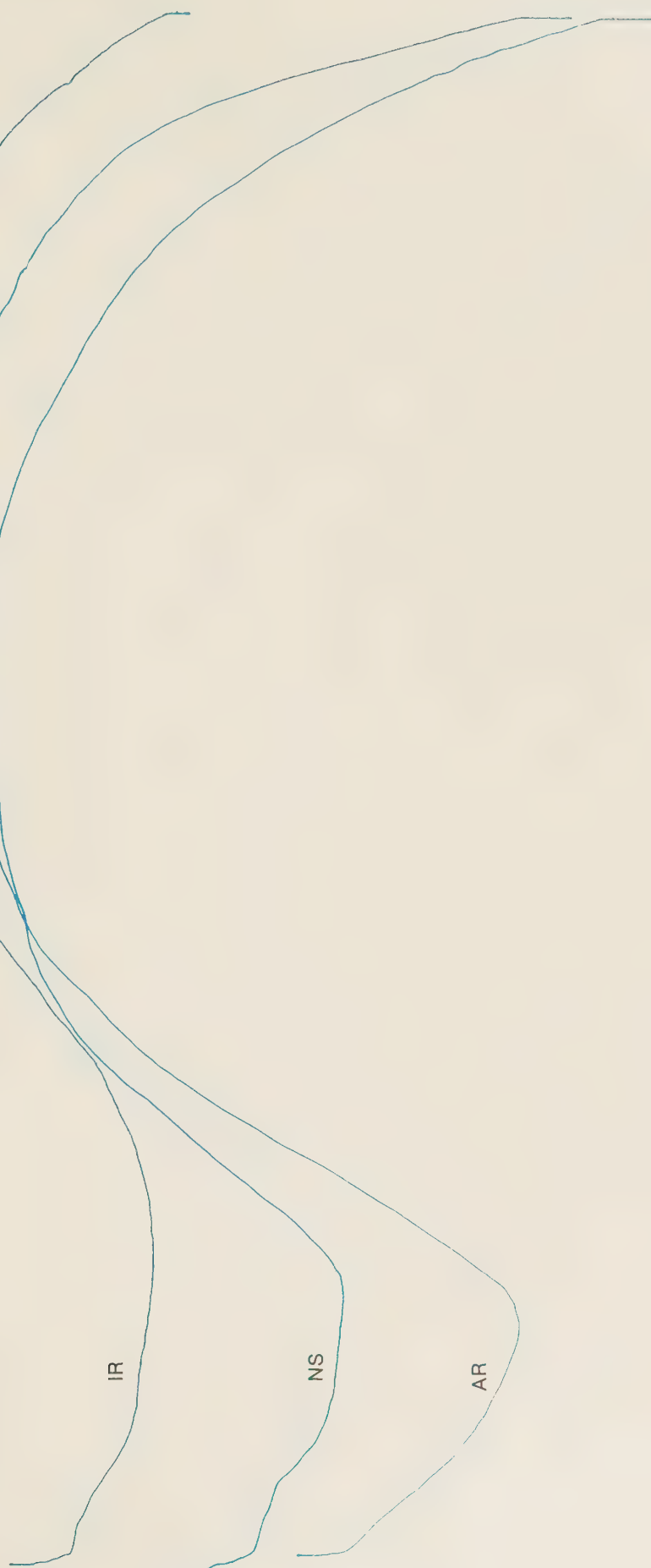
Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

KURVE 2

Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



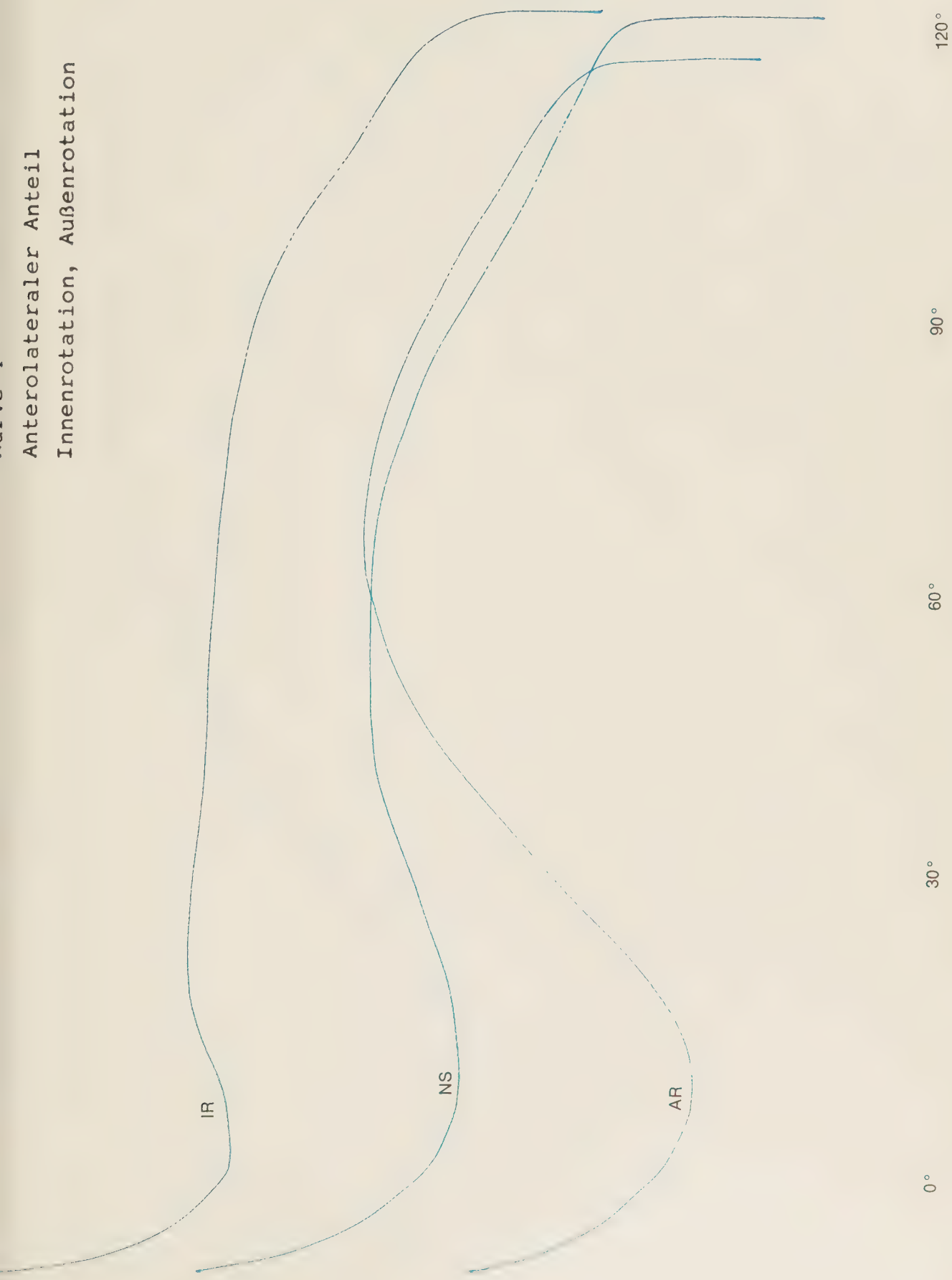
KURVE 3

Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



KURVE 5

Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

KURVE 6

Anterolateraler Anteil

Innenrotation, Außenrotation



KURVE 7

Anterolateraler Anteil

Innenrotation, Außenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

Anterolateraler Anteil
Innenrotation, Außenrotation



KURVE 9
, Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



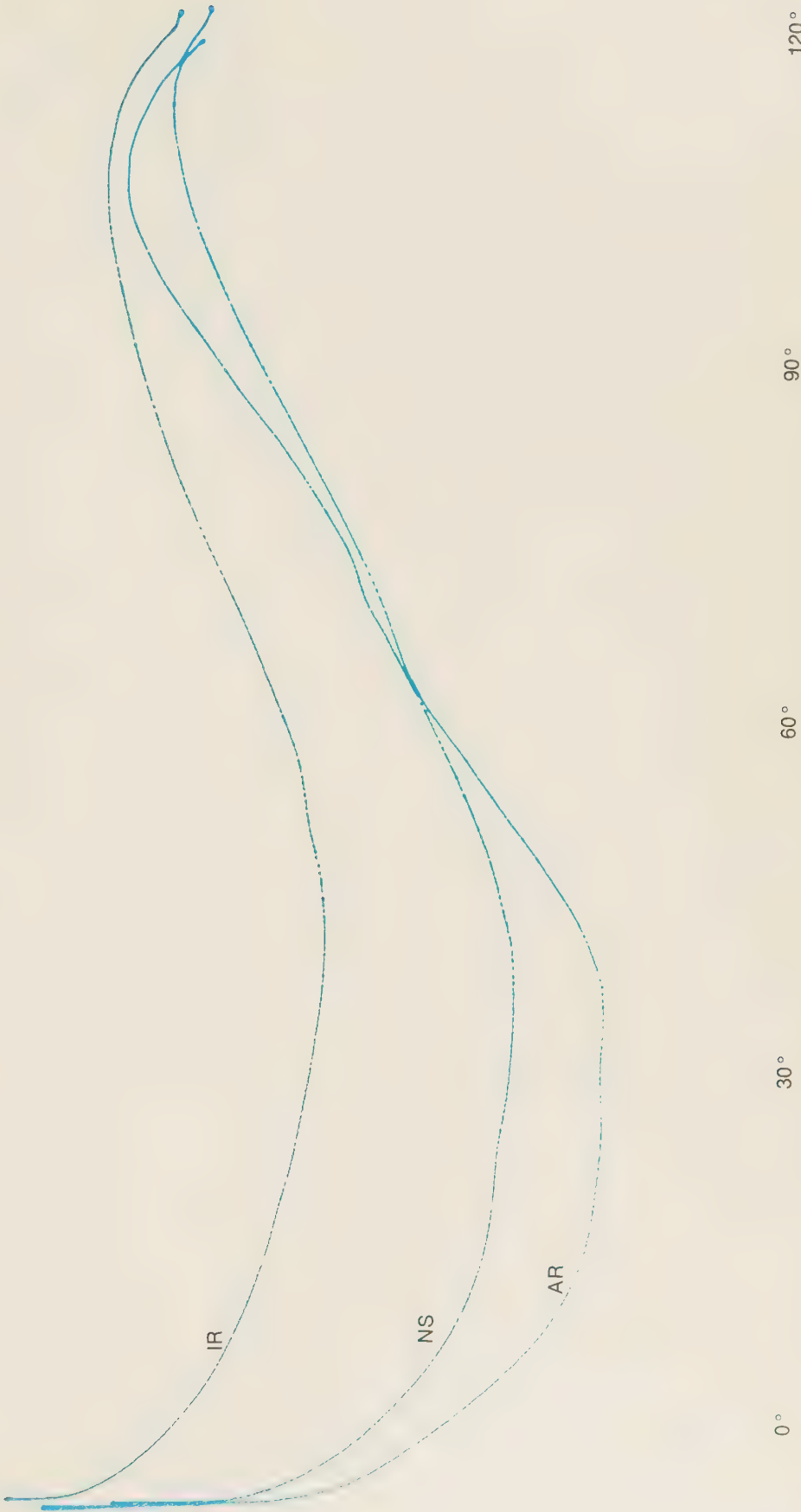
Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



Kurve 15

Posteromedialer Anteil

Innenrotation, Außenrotation



Posteromedialer Anteil
Innenrotation, Außenrotation



Anterolateraler Anteil

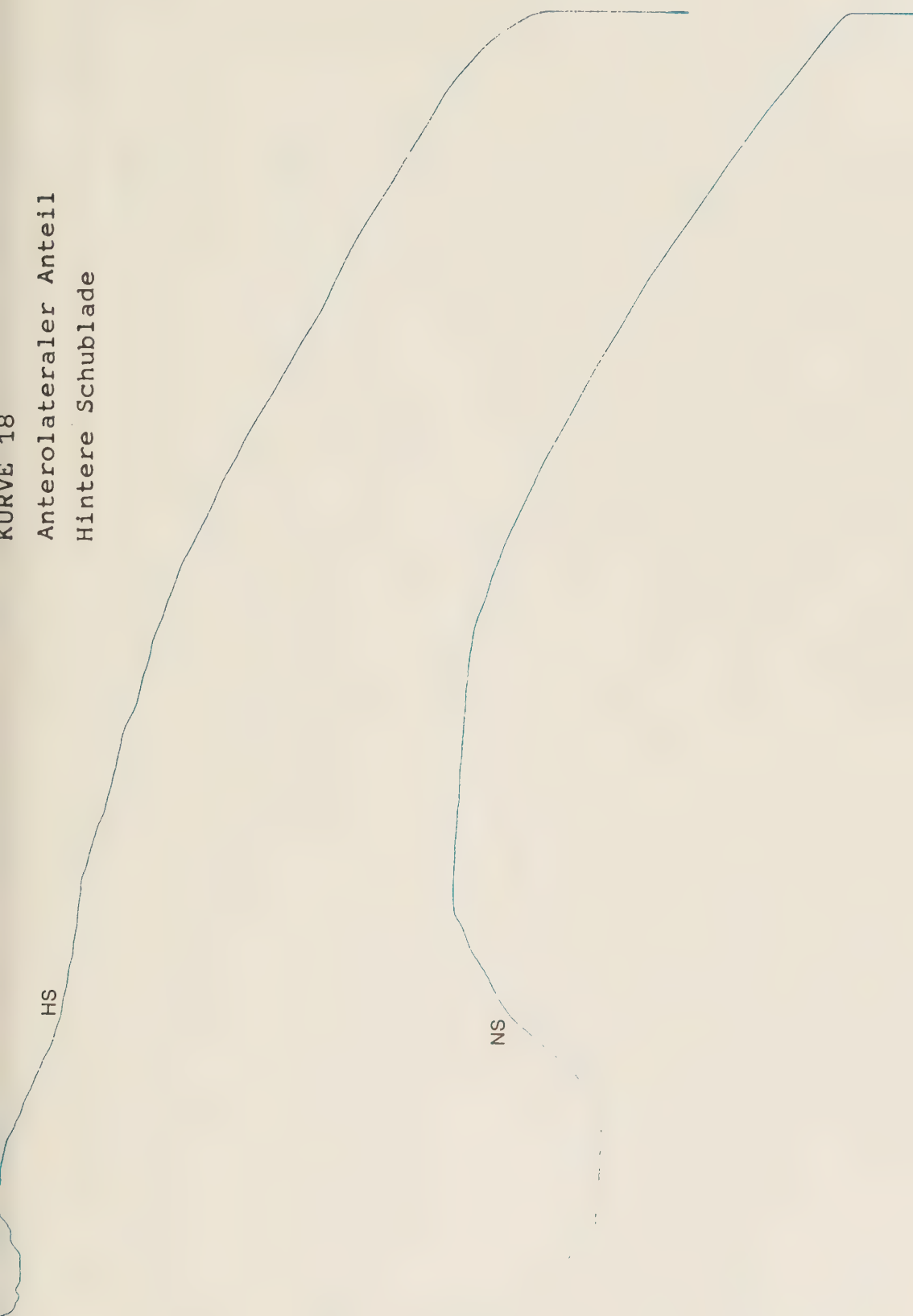
Hintere Schublade, vordere Schublade



KURVE 18

Anterolateraler Anteil

Hintere Schublade



0° 30° 60° 90° 120°

Posteromedialer Anteil

Hintere Schublade, vordere Schublade





KURVE 21
Posteromedialer Anteil
Hintere Schublade



Add.

Abd.

NS

0°

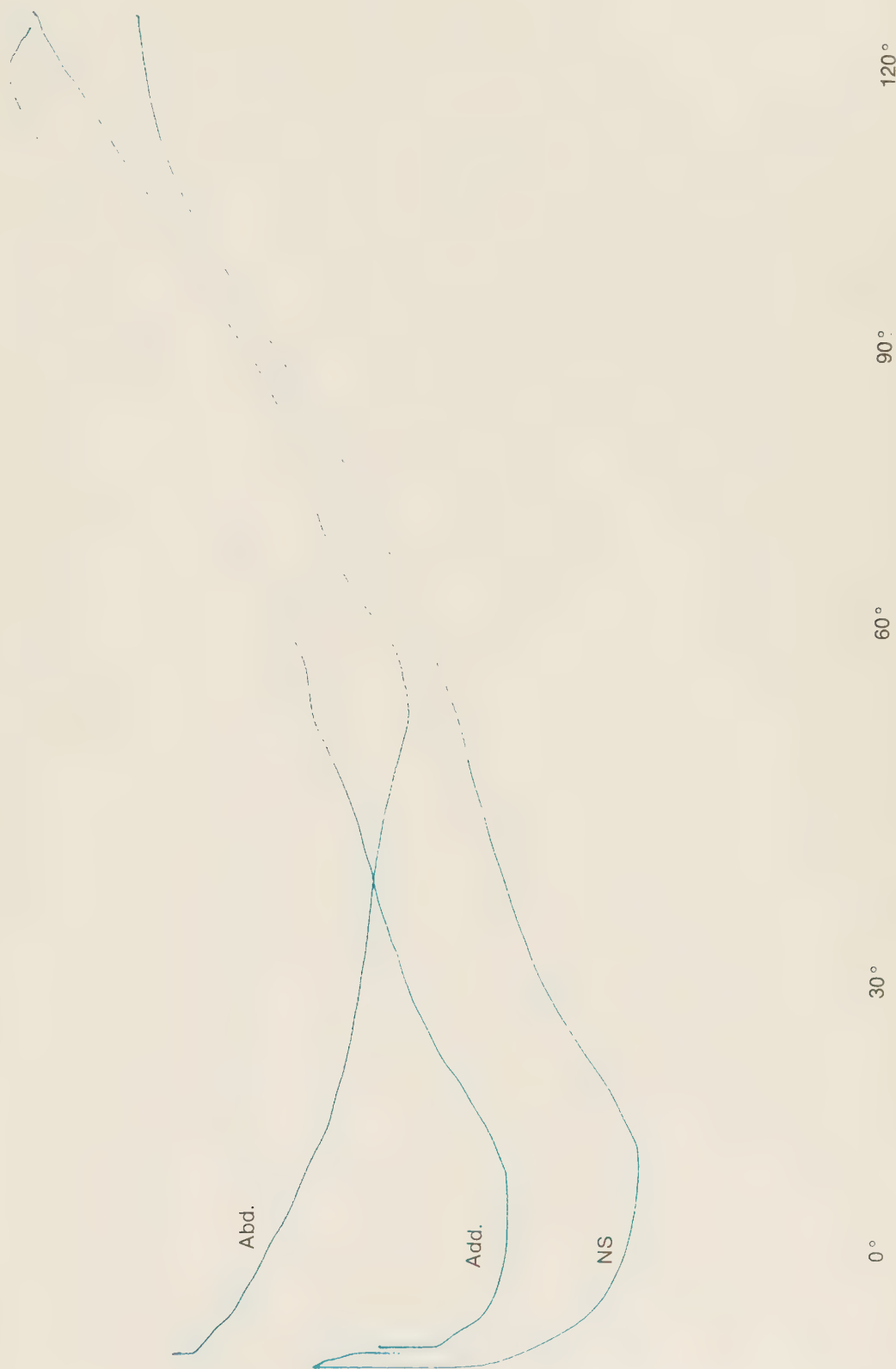
30°

60°

90°

120°

KURVE 23
Posteromedialer Anteil
Abduktion, Adduktion



Durchtrennung von:
- med. Seitenband
Anterolateraler Anteil
Innenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
 - dorsomediale Kapsel
- Anterolateraler Anteil
Innenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband

Anterolateraler Anteil

Innenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des med. Meniskus

Anterolateraler Anteil

Innenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des med. Meniskus

Anterolateraler Anteil

Innenrotation



Durchtrennung von:
-med. Seitenband
Posteromedialer Anteil
Innenrotation



KURVE 29

Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel

Posteromedialer Anteil

Innenrotation

IR n. Verl.

IR

NS

Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband

Posteromedialer Anteil

Innenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des med. Meniskus

Posteromedialer Anteil

Innenrotation

IR n. Verl.

IR

NS

Durchtrennung von:
 - med. Seitenband
 Anterolateraler Anteil
 Außenrotation



Durchtrennung von:
- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
Anterolateraler Anteil
Außenrotation



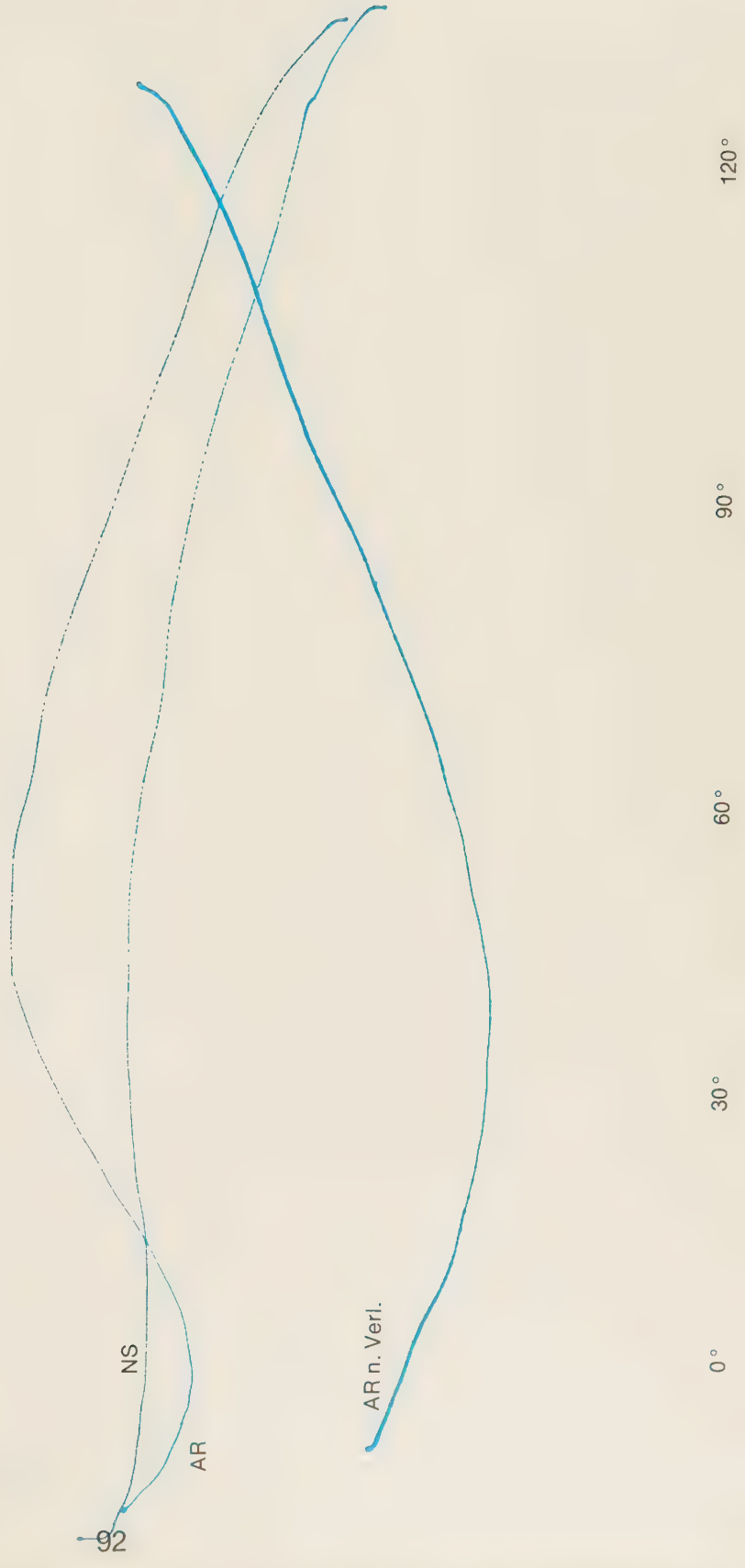
0° 30° 60° 90° 120°

Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband

Anterolateraler Anteil

Außenrotation

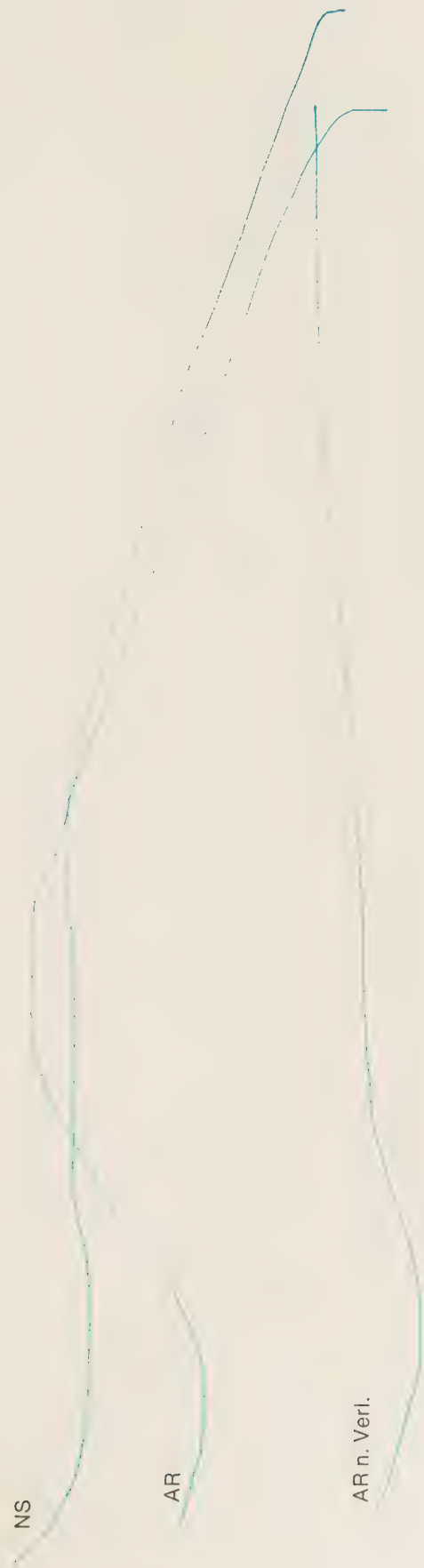


Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des med. Meniskus

Anterolateraler Anteil

Außenrotation



KURVE 36

Durchtrennung von:
- med. Seitenband
Posteromedialer Anteil
Außenrotation



KURVE 37

Durchtrennung von:

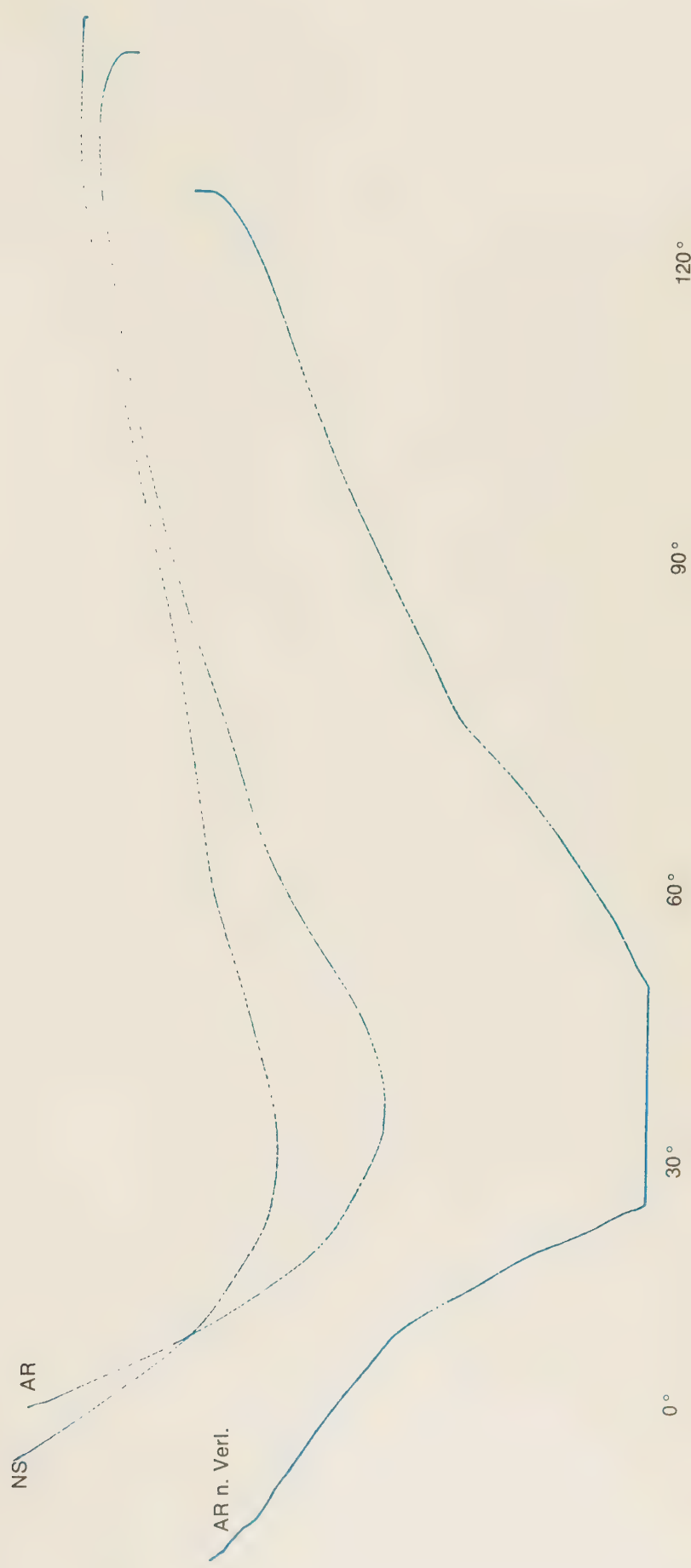
- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel

Posteromedialer Anteil

Außenrotation



Durchtrennung von:
- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
Posteromedialer Anteil
Außenrotation



Durchtrennung von:

- med. Seitenband
- dorsomediale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des med. Meniskus

Posteromedialer Anteil

Außenrotation

NS

AR

97

AR n. Verl.



0°

30°

60°

90°

120°

KURVE 40

Durchtrennung von:
- lat. Seitenband
Anterolateraler Anteil
Innenrotation



KURVE 41

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel

Anterolateraler Anteil

Innenrotation



KURVE 42

Durchtrennung von:
-lat. Seitenband
-dorsolaterale Kapsel
-vorderes Kreuzband
Anterolateraler Anteil
Innenrotation



KURVE 43

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des lat. Meniskus

Anterolateraler Anteil
Innenrotation



KURVE 44

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband

Posteromedialer Anteil

Innenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

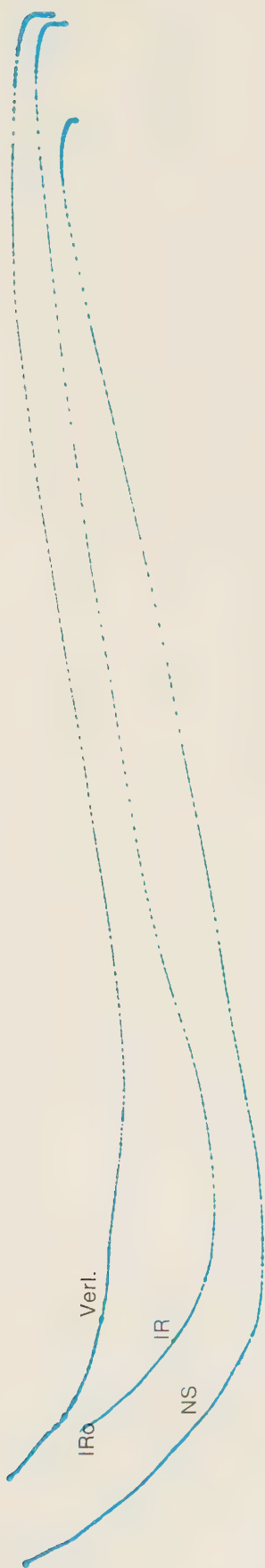
KURVE 45

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel

Posteromedialer Anteil

Innenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

KURVE 46

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- vorderes Kreuzband

Posteromedialer Anteil
Innenrotation



Durchtrennung von :

- lat. Seitenband
- **dorsolaterale Kapsel**
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des lat. Meniskus

Posteromedialer Anteil

Innenrotation



0° 30° 60° 90° 120°

KURVE 48

Durchtrennung von:
- lat. Seitenband
Anterolateraler Anteil
Außenrotation



KURVE 49

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel

Anterolateraler Anteil

Außenrotation



KURVE 50

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- vorderes Kreuzband

Anterolateraler Anteil

Außenrotation



KURVE 51

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des lat. Meniskus

Anterolateraler Anteil

Außenrotation



KURVE 52

Durchtrennung von:
- lat. Seitenband
Posteromedialer Anteil
Außenrotation



KURVE 53

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- Posteromedialer Anteil
- Außenrotation



KURVE 54

- Durchtrennung von:
- lat. Seitenband
 - dorsolaterale Kapsel
 - vorderes Kreuzband
- Posteromedialer Anteil
Außenrotation



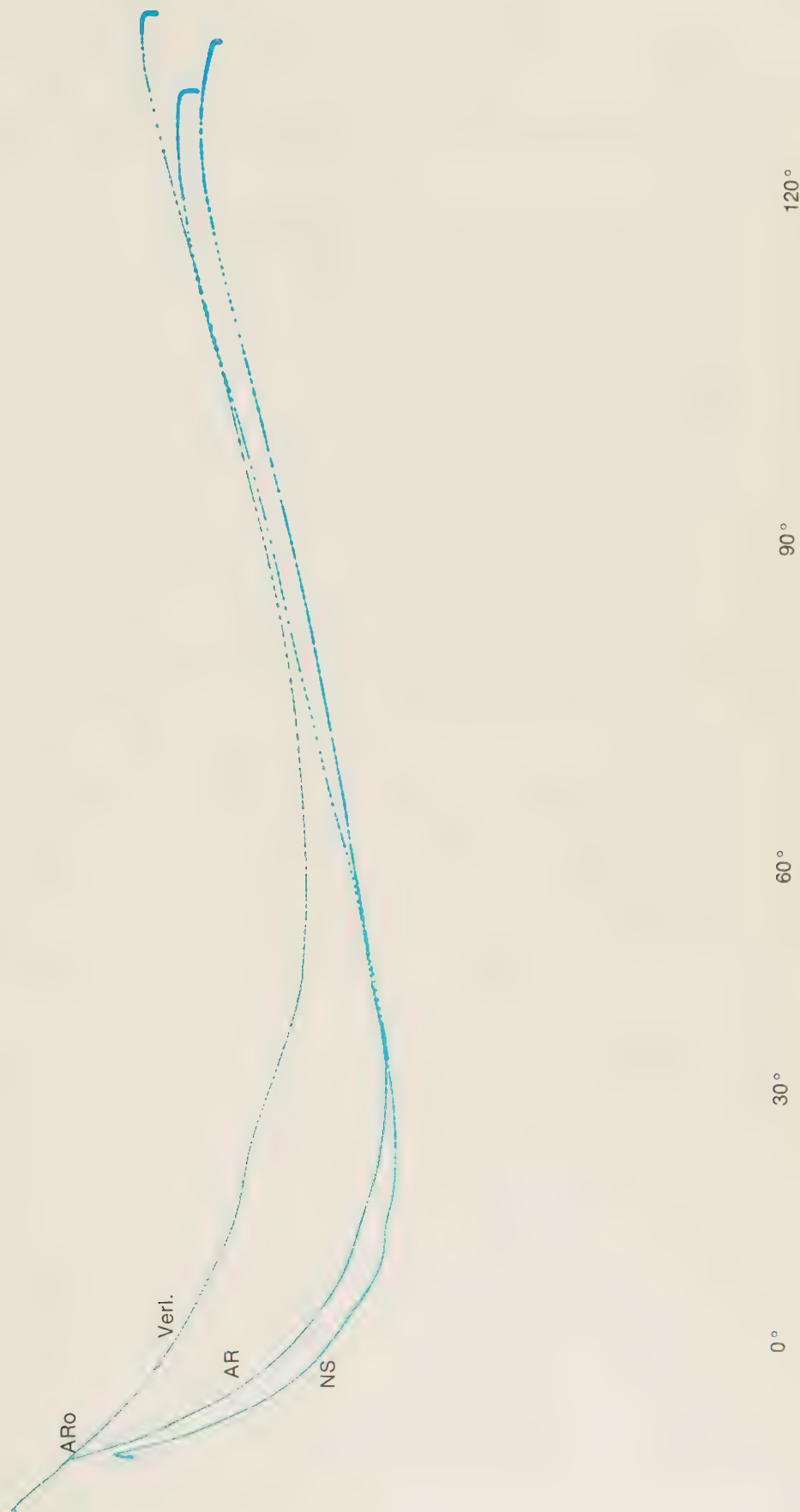
KURVE 55

Durchtrennung von:

- lat. Seitenband
- dorsolaterale Kapsel
- vorderes Kreuzband
- + Herausnahme des lat. Meniskus

Posteromedialer Anteil

Außenrotation



9. Literaturverzeichnis

- 1 Abbott LC, Saunders JBDM, Bost FC, Anderson CE (1944) Injuries to the ligaments of the knee joint . J Bone Joint Surg 26 : 503 - 512
- 2 Augustine RW (1956) The unstable knee . Am J Surg 92 : 380 - 388
- 3 Baumgartl F (1964) Das Kniegelenk . Springer, Berlin
- 4 Brantigan OC, Voshell AF (1946) The mechanics of the ligaments and menisci of the knee joint . J Bone Joint Surg 23 : 44 - 66
- 5 Brantigan OC, Voshell AF (1946) Ligaments of the knee joint . J Bone Joint Surg 28 : 66 - 67
- 6 Brennan JJ (1960) Avulsion injuries of the posterior cruciate ligaments . Clin Orthop 18 : 157 - 163
- 7 Butler DL, Noyes FR, Grood ES, Miller EH (1978) Ligamentous restraints in the human knee : Anterior - posterior stability. Trans Orthop Res Soc 3 : 101
- 8 Clendenin MB, DeLee JC, Heckmann JD (1980) Interstitial tears of the posterior cruciate ligament of the knee. Orthopedics 3 : 764 - 772
- 9 Detenbeck LC (1974) Function of the cruciate ligaments in knee stability. J Sports Med 2 : 217 - 221
- 10 Fischer LP, Guyot J, Gonon GP, Carret JP, Courcelles P, Dahhan P (1978) The role of the muscles and ligaments in stabilization of the knee joint . Anat Clin 1 : 43 - 54
- 11 Fried M (1978) Die Kreuzbandverletzungen der chirurgischen Klinik Rechts der Isar in den Jahren 1965 - 1974 einschließlich der Ergebnisse einer Nachuntersuchung . Dissertation
- 12 Galli A (1963) Kniebandverletzungen . Münch Med Wochenschr 105 : 1066 - 1072
- 13 Gallie WE, Lemesurier AB (1927) The repair of injuries to the posterior crucial ligament of the knee joint. Ann Surg 85 : 592 - 598
- 14 Girgis FH, Marshall JL, AlMonajem ARS (1975) The cruciate ligaments of the knee joint. Clin Orthop 106 : 216 - 231

- 15 Glinz W, Marty A (1969) Zur Beurteilung von Kreuzbandverletzungen. *Helv Chir Acta* 36 : 433 - 442
- 16 Hallen LG, Lindahl O (1965) The lateral stability of the knee joint . *Acta Orthop Scand* 36 : 179 - 191
- 17 Hallen LG, Lindahl O (1965) Rotation in the knee joint in experimental injury to the ligaments. *Acta Orthop Scand* 36 : 400 - 407
- 18 Hertel P, Schweiberer L (1975) Biomechanik und Pathophysiologie des Kniebandapparates . *Hefte Unfallheilkd* 125 : 1 - 16
- 19 Hertel P (1980) Verletzung und Spannung von Kniebändern : Experimentelle Studie . *Hefte Unfallheilkd* 142
- 20 Holz U, Weller S (1975) Entstehung und Diagnostik der frischen Bandverletzung. *Hefte Unfallheilkd* 125
- 21 Hönigschmied J (1893) Leichenexperimente über die Zerreißungen der Bänder im Kniegelenk. *Dtsch Z Chir* 36 : 587 - 620
- 22 Horwitz M (1938) An investigation of the surgical anatomy of the ligaments of the knee joint. *Surg Gynecol Obstet* 67 : 287 - 292
- 23 Horwitz M (1939) Injuries of the ligaments of the knee joint. *Arch Surg* 38 : 946 - 954
- 24 Hughston JC (1969) The posterior cruciate ligament in knee joint stability. *J Bone Joint Surg* 51-A : 1054 - 1046
- 25 Hughston JC, Andrews JR, Cross MJ, Moschi A (1976) Classification of the knee ligament instabilities. Part I. The medial compartment and cruciate ligaments. *J Bone Joint Surg* 58-A : 159 - 172
- 26 Hughston JC, Andrews JR, Cross HJ, Moschi A (1976) Classification of knee ligament instabilities. Part II. The lateral compartment. *J Bone Joint Surg* 58-A : 173 - 179
- 27 Huson A (1974) Biomechanische Probleme des Kniegelenks . *Der Orthopäde* 3 : 119 - 125

- 28 Insall JN, Hood RW (1982) Bone-block transfer of the medial head of the gastrocnemius for the posterior cruciate insufficiency. J Bone Joint Surg 64-A : 691 - 699
- 29 Jonasch E (1957) 1141 Fälle von Zerreißungen des inneren und 70 des äußeren Knieseitenbandes. Wiederherstellungschir Traum 4 : 126 - 155
- 30 Kaplan EB (1962) Some aspects of functional anatomy of the human knee joint. Clin Orthop 23 : 18 - 29
- 31 Kennedy JC, Fowler PJ (1971) Medial and anterior instability of the knee. J Bone Joint Surg 53-A : 1257 - 1270
- 32 Kennedy JC, Grainger RW (1967) The posterior cruciate ligament. J Trauma 7 : 367 - 377
- 33 Kennedy JC, Hawkins RJ, Willis RB, Danylchuk KD (1976) Tension studies of the human knee ligaments. J Bone Joint Surg 58-A : 350 - 355
- 34 Küsswetter W, Wirth CJ (1978) Simultane Spannungsmessungen am Kapselbandapparat des Kniegelenkes, Orthop Prax 14 : 199 - 200
- 35 Lange M (1957) Kritische Stellungnahme zur Frage der konservativen oder operativen Behandlung schwerer Kniebandverletzungen. Wiederherstellungschir Traum 4 : 197 - 222
- 36 Last RJ (1948) Some anatomical details of the knee joint. J Bone Joint Surg 30-B : 683 - 688
- 37 Marshall JL, Baugher WH (1980) Stability examination of the knee : A simple anatomic approach . Clin Orthop 146 : 78 - 83
- 38 Mc Cormick WC, Bagg RJ, Kennedy CW, Leukens CA (1976) Reconstruction of the posterior cruciate ligament. Clin Orthop 118 : 30 - 34
- 39 McMaster WC (1975) Isolated posterior cruciate ligament injury : literature review and case reports. J Trauma 15 : 1025 - 1029
- 40 Meyers MH (1975) Isolated avulsion of the tibial attachment of the posterior cruciate ligament of the knee. J Bone Joint Surg 57-A : 669 - 672

- 41 Müller W (1975) Die Rotationsinstabilität am Kniegelenk. Hefte Unfallheilkd 125
- 42 O'Donoghue DH (1955) An analysis of end results of surgical treatment of major injuries to the ligaments of the knee. J Bone Joint Surg 32-A : 721 - 738
- 43 O'Donoghue DH, Rockwood CA, Frank GR, Jck SC, Kenyon R (1966) Repair of the anterior cruciate ligament in dogs. J Bone Joint Surg 48-A : 503 - 519
- 44 Palmer I (1938) On the injuries to the ligaments of the knee joint. Acta Chir Scand 81 : 1 - 282
- 45 Pickett JC, Altizer TJ (1971) Injury of the ligaments of the knee. A study of types of injury and treatment in 129 patients. Clin Orthop 76 : 27 - 32
- 46 Pritchett JW (1982) A statistical study of the knee injuries due to football in highschool athletes. J Bone Joint Surg 64-A : 240 - 241
- 47 Rehn J (1973) Bandverletzungen des Kniegelenkes. Z Orthop 111 : 359 - 363
- 48 Shaw JA, Eng M, Murray DG (1974) The longitudinal axis of the knee and the role of the cruciate ligaments in controlling transverse rotation. J Bone Joint Surg 56-A : 1603 - 1609
- 49 Slocum DB, Larson RL (1968) Rotatory instability of the knee. Its pathogenesis and a clinical test to demonstrate its presence. J Bone Joint Surg 50-A : 211 - 225
- 50 Torisu, Takehiko (1977) Isolated avulsion fracture of the tibial attachment of the posterior cruciate ligament. J Bone Joint Surg 59-A : 68 - 72
- 51 Trickey EL (1968) Rupture of the posterior cruciate ligament of the knee. J Bone Joint Surg 50-B : 334 - 341
- 52 Wang CJ, Walker PS (1973) The effects of flexion and rotation on the length patterns of the ligaments of the knee. J Biomech 6 : 587 - 596
- 53 Wirth CJ, Artmann M (1975) Diagnostische Probleme bei frischen und veralteten Kreuzbandverletzungen des Kniegelenks. Arch Orthop Unfallchir 81 : 333 - 340

